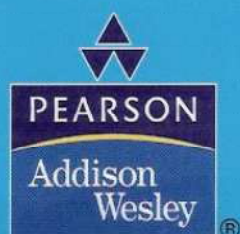


FÍSICA

CONCEPTUAL

PAUL G. HEWITT

Décima edición



Algunas fechas importantes en la historia de la Física

APROX. 320 A. C.	Aristóteles describe el movimiento en términos de tendencias naturales.
APROX. 250 A. C.	Arquímedes descubre el principio de flotabilidad.
APROX. 150 D. C.	Tolomeo refina el sistema geocéntrico.
1543	Copérnico publica su sistema heliocéntrico.
1575-1596	Brahe mide posiciones precisas de los planetas en el cielo.
1609	Galileo usa por primera vez un telescopio como herramienta astronómica.
1609/1619	Kepler publica tres leyes del movimiento planetario.
1634	Galileo avanza en la comprensión del movimiento acelerado.
1661	Boyle relaciona la presión y el volumen de los gases a temperatura constante.
1676	Roemer demuestra que la luz tiene una rapidez finita.
1678	Huygens desarrolla una teoría ondulatoria de la luz.
1687	Newton presenta la teoría de la mecánica en <i>Principia</i> .
1738	Bernoulli explica el comportamiento de los gases en términos de movimientos moleculares.
1747	Franklin sugiere la conservación del "fuego" eléctrico (la carga).
1780	Galvani descubre la "electricidad animal".
1785	Coulomb determina con precisión la ley de la fuerza eléctrica.
1795	Cavendish mide la constante gravitacional G .
1798	Rumford dice que el calor es una forma de movimiento.
1800	Volta inventa la batería eléctrica.
1802	Young aplica la teoría ondulatoria para explicar la interferencia.
1811	Avogadro sugiere que a iguales temperatura y presión, todos los gases tienen la misma cantidad de moléculas por unidad de volumen.
1815-1820	Young y otros dan pruebas de la naturaleza ondulatoria de la luz.
1820	Oersted descubre el efecto magnético de una corriente eléctrica.
1820	Ampère establece la ley de fuerza entre conductores con corriente eléctrica.
1821	Fraunhofer inventa la rejilla de difracción.
1824	Carnot establece que el calor no se puede transformar totalmente en trabajo.
1831	Faraday y Henry descubren la inducción electromagnética.
1842-1843	Mayer y Joule sugieren una ley general de la conservación de la energía.
1846	Adams y Leverrier predicen la existencia del planeta Neptuno.
1865	Maxwell presenta la teoría electromagnética de la luz.
1869	Mendeleev organiza los elementos en una tabla periódica.
1877	Boltzmann relaciona la entropía con la probabilidad.
1885	Balmer establece la regularidad numérica en el espectro de hidrógeno.
1887	Michelson y Morley no pueden detectar el éter.
1888	Hertz genera y detecta las ondas de radio.
1895	Roentgen descubre los rayos X.

1896	Becquerel descubre la radiactividad.
1897	Thomson establece que los rayos catódicos son corpúsculos negativos (electrones).
1900	Planck presenta la idea cuántica.
1905	Einstein presenta el concepto de corpúsculo de luz (fotón).
1905	Einstein presenta la teoría de la relatividad especial.
1911	Rutherford descubre el átomo nuclear.
1913	Bohr formula una teoría cuántica del átomo de hidrógeno.
1915	Einstein presenta la teoría de la relatividad general.
1923	Compton confirma con experimentos la existencia del fotón.
1924	De Broglie presenta la teoría ondulatoria de la materia.
1925	Goudsmit y Uhlenbeck establecen el espín del electrón.
1925	Pauli forma el principio de exclusión.
1926	Schrödinger desarrolla la teoría ondulatoria de la mecánica cuántica.
1927	Davisson, Gremer y Thomson comprueban la naturaleza ondulatoria de los electrones.
1927	Heisenberg propone el principio de incertidumbre.
1928	Dirac combina la relatividad y la mecánica cuántica en una teoría del electrón.
1929	Hubble descubre que el Universo se expande.
1932	Anderson descubre la materia en forma de positrón.
1932	Chadwick descubre el neutrón.
1932	Heisenberg describe la explicación de la estructura nuclear como neutrones y protones.
1934	Fermi propone una teoría de la aniquilación y la creación de la materia.
1938	Meitner y Frisch interpretan los resultados de Hahn y Strassmann como fisión nuclear.
1939	Bhor y Wheeler presentan una teoría detallada de la fisión nuclear.
1942	Fermi construye y opera el primer reactor nuclear.
1945	Oppenheimer y su equipo producen una explosión nuclear, en Los Álamos.
1947	Bardeen, Brattain y Shockley desarrollan el transistor.
1956	Reines y Cowan identifican al antineutrino.
1957	Feynman y Gell-Mann explican todas las interacciones débiles con un neutrino "izquierdo".
1960	Maiman inventa el láser.
1965	Penzias y Wilson descubren la radiación de fondo en el Universo, residuo del Big Bang.
1967	Bell y Hewish descubren los pulsares, que son estrellas de neutrones.
1968	Wheeler bautiza los agujeros negros.
1969	Gell-Mann sugiere que los quarks son los bloques constructivos de los nucleones.
1977	Lederman y su equipo descubren el quark "bottom" (fondo).
1981	Binning y Rohrer inventan el microscopio de barrido y tunelización.
1987	Bednorz y Müller descubren la superconductividad de alta temperatura.
1995	Cornell y Wieman crean un "condensado Bose-Einstein" a 20 milésimas de millonésimas de un grado.
2000	Pogge y Martini demuestran la existencia de agujeros negros supermasivos en otras galaxias.

Contenido breve

Contenido vii

Al estudiante xiii

Al profesor xiv

Agradecimientos xvii

1 Acerca de la ciencia 2

PARTE UNO

Mecánica 21

- 2 Primera ley de Newton del movimiento: inercia 22
- 3 Movimiento rectilíneo 41
- 4 Segunda ley de Newton 58
- 5 Tercera ley de Newton del movimiento 74
- 6 Cantidad de movimiento 91
- 7 Energía 110
- 8 Movimiento rotatorio 131
- 9 Gravedad 161
- 10 Movimiento de proyectiles y de satélites 184

PARTE DOS

Propiedades de la materia 209

- 11 La naturaleza atómica de la materia 210
- 12 Sólidos 229
- 13 Líquidos 248
- 14 Gases y plasmas 268

PARTE TRES

Calor 289

- 15 Temperatura, calor y expansión 290
- 16 Transferencia de calor 306
- 17 Cambio de fase 325
- 18 Termodinámica 342

PARTE CUATRO

Sonido 361

- 19 Vibraciones y ondas 362
- 20 Sonido 380
- 21 Sonidos musicales 398

PARTE CINCO

Electricidad y magnetismo 409

- 22 Electrostática 410
- 23 Corriente eléctrica 436
- 24 Magnetismo 458
- 25 Inducción electromagnética 477

PARTE SEIS

Luz 495

- 26 Propiedades de la luz 496
- 27 Color 515
- 28 Reflexión y refracción 530
- 29 Ondas luminosas 558
- 30 Emisión de la luz 582
- 31 Cuantos de luz 600

PARTE SIETE

Física atómica y nuclear 619

- 32 El átomo y el cuanto 620
- 33 El núcleo atómico y la radiactividad 634
- 34 Fisión y fusión nucleares 661

PARTE OCHO

Relatividad 685

- 35 Teoría de la relatividad especial 686
- 36 Teoría de la relatividad general 720
- Epílogo 735

Apéndice A Sistemas de medida 737

Apéndice B Más acerca del movimiento 741

Apéndice C Trazado de gráficas 745

Apéndice D Más acerca de vectores 749

Apéndice E Crecimiento exponencial y tiempo de duplicación 755

Glosario 761

Créditos de fotografías 778

Índice 781

Contenido

Al estudiante xiii

Al profesor xiv

Agradecimientos xvii

1 Acerca de la ciencia 2

Mediciones científicas 3

El tamaño de la Tierra 3

El tamaño de la Luna 4

Distancia a la Luna 6

Distancia al Sol 6

El tamaño del Sol 7

Matemáticas: el lenguaje de la ciencia 8

El método científico 9

La actitud científica 9

Ciencia, arte y religión 14

Ciencia y tecnología 15

Física: la ciencia básica 16

En perspectiva 17

PARTE UNO

Mecánica 21

2 Primera ley de Newton del movimiento: inercia 22

El movimiento según Aristóteles 22

Copérnico y la Tierra en movimiento 24

Galileo y la Torre Inclinada 24

Los planos inclinados de Galileo 25

Primera ley de Newton del movimiento 27

Fuerza neta 28

La regla del equilibrio 32

Fuerza de soporte 34

Equilibrio de cosas en movimiento 35

La Tierra en movimiento 36

3 Movimiento rectilíneo 41

El movimiento es relativo 41

Rapidez 41

Rapidez instantánea 42

Rapidez media 42

Velocidad 43

Velocidad constante 44

Velocidad variable 44

Aceleración 44

La aceleración en los planos inclinados de Galileo 47

Caída libre 47

Qué tan rápido 47

Hasta dónde 49

"Qué tan rápido" cambia de rapidez 51

4 Segunda ley de Newton 58

La fuerza causa aceleración 58

Fricción 59

Masa y peso 61

Una masa se resiste a acelerar 63

Segunda ley de Newton del movimiento 64

Cuando la aceleración es g (caída libre) 65

Cuando la aceleración es menor que g (caída no libre) 66

5 Tercera ley de Newton del movimiento 74

Fuerzas e interacciones 74

Tercera ley de Newton del movimiento 75

Definición de tu sistema 77

Acción y reacción sobre masas distintas 79

Resumen de las tres leyes de Newton 82

Vectores 82

Vectores fuerza 83

Vectores velocidad 83

Componentes de vectores 85

6 Cantidad de movimiento 91

Cantidad de movimiento 91

Impulso 92

El impulso cambia la cantidad de movimiento 93

Caso 1: aumento de la cantidad de movimiento 94

Caso 2: disminución de la cantidad de movimiento 94

Caso 3: disminución de la cantidad de movimiento durante corto tiempo 95

Rebote 96

Conservación de la cantidad de movimiento 98

Choques 100

Choques más complicados 103

7 Energía 110

Trabajo 110

Potencia 111

- Energía mecánica 112
 - Energía potencial* 113
 - Energía cinética* 114
 - Teorema del trabajo y la energía* 115
- Conservación de la energía 117
- Máquinas 118
- Eficiencia 120
- Comparación de la energía cinética y la cantidad de movimiento 121
- Energía para la vida 123
- Fuentes de energía 123

8 Movimiento rotatorio 131

- Movimiento circular 131
- Inercia rotacional 134
- Momento de torsión (torque) 137
- Centro de masa y centro de gravedad 139
 - Ubicación del centro de gravedad* 140
 - Estabilidad* 142
- Fuerza centrípeta 144
- Fuerza centrífuga 145
- Fuerza centrífuga en un marco de referencia rotatorio 147
- Gravedad simulada 148
- Cantidad de movimiento angular 150
- Conservación de la cantidad de movimiento angular 151

9 Gravedad 161

- La ley universal de la gravedad 161
- La constante G de la gravitación universal 163
- Gravedad y distancia: la ley del inverso del cuadrado 165
- Peso e ingravidez 166
- Mareas 168
 - Mareas en la Tierra y en la atmósfera* 171
 - Mareas en la Luna* 172
- Campos gravitacionales 172
 - Campo gravitacional en el interior de un planeta* 173
- Teoría de Einstein sobre la gravitación 175
- Agujeros negros 175
- Gravitación universal 177

10 Movimiento de proyectiles y de satélites 184

- Movimiento de proyectiles 184
 - Proyectiles disparados horizontalmente* 185
 - Proyectiles lanzados en ángulo* 186
- Proyectiles con movimiento rápido: satélites 192
- Órbitas circulares de satélites 194
- Órbitas elípticas 196
- Leyes de Kepler del movimiento planetario 199
- Conservación de la energía y movimiento de los satélites 200
- Rapidez de escape 201

PARTE DOS

Propiedades de la materia 209

11 La naturaleza atómica de la materia 210

- La hipótesis atómica 210
- Características de los átomos 211
- Imágenes atómicas 214
- Estructura atómica 215
- Los elementos 217
- La tabla periódica de los elementos 218
- Isótopos 218
- Compuestos y mezclas 221
- Moléculas 221
- Antimateria 223
- Materia oscura 224

12 Sólidos 229

- El micrografo de Müller 229
- Estructura cristalina 230
- Densidad 232
- Elasticidad 233
- Tensión y compresión 235
- Arcos 237
- Escalamiento 239

13 Líquidos 248

- Presión 248
- Presión en un líquido 249
- Flotabilidad 252
- Principio de Arquímedes 253
- ¿Qué hace que un objeto flote o se hunda? 255
- Flotación 256
- Principio de Pascal 258
- Tensión superficial 260
- Capilaridad 261

14 Gases y plasmas 268

- La atmósfera 268
- Presión atmosférica 269
 - Barómetro* 271
- Ley de Boyle 274
- Flotabilidad del aire 275
- Principio de Bernoulli 277
 - Aplicaciones del principio de Bernoulli* 278
- Plasma 281
 - Plasma en el mundo cotidiano* 281
 - Generación de energía con plasma* 282

PARTE TRES

Calor 289**15 Temperatura, calor y expansión 290**

Temperatura 290

Calor 292

Medición del calor 294

Capacidad calorífica específica 294

Alta capacidad calorífica específica del agua 295

Expansión térmica 297

Expansión del agua 299**16 Transferencia de calor 306**

Conducción 306

Convección 308

Radiación 310

Emisión de energía radiante 312*Absorción de energía radiante* 313*Reflexión de energía radiante* 314*Enfriamiento nocturno por radiación* 315

Ley de Newton del enfriamiento 316

El efecto invernadero 317

Energía solar 319

Control de la transferencia de calor 320

17 Cambio de fase 325

Evaporación 325

Condensación 327

Condensación en la atmósfera 328*Nieblas y nubes* 329

Ebullición 330

Géiseres 331*La ebullición es un proceso de enfriamiento* 331*Ebullición y congelación al mismo tiempo* 331

Fusión y congelación 332

Regelamiento 333

Energía y cambios de fase 333

18 Termodinámica 342

Cero absoluto 342

Energía interna 344

Primera ley de la termodinámica 344

Proceso adiabático 346

Meteorología y la primera ley 346

Segunda ley de la termodinámica 350

Máquinas térmicas 350

El orden tiende al desorden 354

Entropía 356

PARTE CUATRO

Sonido 361**19 Vibraciones y ondas 362**

Oscilación de un péndulo 362

Descripción de una onda 363

Movimiento ondulatorio 365

Rapidez de una onda 366

Ondas transversales 367

Ondas longitudinales 368

Interferencia 369

Ondas estacionarias 370

Efecto Doppler 372

Ondas de proa 373

Ondas de choque 374

20 Sonido 380

Origen del sonido 380

Naturaleza del sonido en el aire 381

Medios que transmiten el sonido 382

Rapidez del sonido en el aire 383

Reflexión del sonido 384

Refracción del sonido 385

Energía en las ondas sonoras 387

Vibraciones forzadas 387

Frecuencia natural 387

Resonancia 388

Interferencia 389

Pulsaciones 391

21 Sonidos musicales 398

Altura 398

Intensidad y sonoridad del sonido 399

Calidad 400

Instrumentos musicales 402

Análisis de Fourier 402

Discos compactos 404

PARTE CINCO

Electricidad y magnetismo 409

22 Electrostática 410

- Fuerzas eléctricas 410
- Cargas eléctricas 411
- Conservación de la carga 412
- Ley de Coulomb 414
- Conductores y aislantes 415
 - Semiconductores* 416
- Superconductores 416
- Carga 417
 - Carga por fricción y por contacto* 417
 - Carga por inducción* 417
- Polarización de carga 419
- Campo eléctrico 421
 - Blindaje eléctrico* 424
- Potencial eléctrico 425
- Almacenamiento de la energía eléctrica 428
 - Generador Van de Graaff* 429

23 Corriente eléctrica 436

- Flujo de carga 436
- Corriente eléctrica 437
- Fuentes de voltaje 437
- Resistencia eléctrica 439
- Ley de Ohm 439
 - Ley de Ohm y choques eléctricos* 440
- Corriente directa y corriente alterna 442
 - Conversión de ca a cd* 443
- Rapidez y fuente de electrones en un circuito 444
- Potencia eléctrica 446
- Circuitos eléctricos 448
 - Circuitos en serie* 448
 - Circuitos en paralelo* 449

- Circuitos en paralelo y sobrecarga* 450
- Fusibles de seguridad* 451

24 Magnetismo 458

- Fuerzas magnéticas 458
- Polos magnéticos 459
- Campos magnéticos 460
- Dominios magnéticos 461
- Corrientes eléctricas y campos magnéticos 464
 - Electroimanes* 465
 - Electroimanes superconductores* 465
- Fuerza magnética sobre partículas con carga en movimiento 466
- Fuerza magnética sobre conductores con corriente eléctrica 467
 - Medidores eléctricos* 468
 - Motores eléctricos* 468
- El campo magnético de la Tierra 469
 - Rayos cósmicos* 471
- Biomagnetismo 472

25 Inducción electromagnética 477

- Inducción electromagnética 477
- Ley de Faraday 478
- Generadores y corriente alterna 480
- Producción de energía eléctrica 481
 - Energía de un turbogenerador* 481
 - Energía magnetohidrodinámica* 482
 - Transformadores* 483
- Autoinducción 486
- Transmisión de electricidad 487
- Inducción de campos 488
- En perspectiva 489

PARTE SEIS

Luz 495

26 Propiedades de la luz 496

- Ondas electromagnéticas 496
 - Velocidad de una onda electromagnética* 497
 - El espectro electromagnético* 498
- Materiales transparentes 499
- Materiales opacos 502

- Sombras* 503

- Visión de la luz: el ojo 506

27 Color 515

- Reflexión selectiva 515
- Transmisión selectiva 517
- Mezcla de luces de colores 518
 - Colores complementarios* 519

- Mezcla de pigmentos de colores 520
- Por qué el cielo es azul 521
- Por qué los crepúsculos son rojos 523
- Por qué las nubes son blancas 525
- Por qué el agua es azul verdosa 525

28 Reflexión y refracción 530

- Reflexión 530
- Principio del tiempo mínimo 531
- Ley de la reflexión 531
 - Espejos planos* 533
 - Reflexión difusa* 534
- Refracción 535
 - Espejismos* 537
- Causa de la refracción 538
 - Dispersión* 540
 - Arcoiris* 541
- Reflexión interna total 543
- Lentes 546
 - Formación de imagen por una lente* 548
- Defectos de las lentes 550

29 Ondas luminosas 558

- Principio de Huygens 558
- Difracción 560
- Interferencia 562

- Interferencia en película delgada con un solo color* 566
- Colores de interferencia debidos a la reflexión en películas delgadas* 568

- Polarización 570
 - Visión tridimensional* 573
- Holografía 576

30 Emisión de la luz 582

- Excitación 582
 - Espectros de emisión* 585
- Incandescencia 586
 - Espectros de absorción* 588
- Fluorescencia 589
 - Lámparas fluorescentes* 591
- Fosforescencia 591
- Láseres 592

31 Cuantos de luz 600

- Nacimiento de la teoría cuántica 601
- Cuantización y la constante de Planck 601
- Efecto fotoeléctrico 603
- Dualidad onda-partícula 605
- Experimento de la doble rendija 606
- Partículas como ondas: difracción de electrones 608
- Principio de incertidumbre 610
- Complementariedad 613

PARTE SIETE

Física atómica y nuclear 619

32 El átomo y el cuanto 620

- Descubrimiento del núcleo atómico 620
- Descubrimiento del electrón 621
- Espectros atómicos: claves de la estructura atómica 623
- Modelo de Bohr del átomo 624
- Tamaños relativos de los átomos 625
- Explicación de los niveles de energía cuantizados: ondas electrónicas 627
- Mecánica cuántica 629
- Principio de correspondencia 631

33 El núcleo atómico y la radiactividad 634

- Rayos X y radiactividad 634
- Rayos alfa, beta y gamma 635
- El núcleo 637
- Isótopos 638
- Por qué los átomos son radiactivos 639
- Vida media 641
 - Detectores de radiación* 642

- Transmutación de los elementos 644
 - Transmutación natural de los elementos* 645
 - Transmutación artificial* 647

- Isótopos radiactivos 649
- Fechado con carbono 651
 - Fechado con carbono* 651
 - Fechado con uranio* 653
- Efectos de la radiación en los seres humanos 653
 - Dosimetría de la radiación* 656

34 Fisión y fusión nucleares 661

- Fisión nuclear 661
- Reactores nucleares de fisión 664
- Plutonio 667
- El reactor reproductor 668
- Energía de fisión 669
- Equivalencia entre masa y energía 670
- Fusión nuclear 675
- Control de la fusión 678

PARTE OCHO

Relatividad 685**35 Teoría de la relatividad especial 686**

El movimiento es relativo 687

El experimento de Michelson-Morley 687

Postulados de la teoría de la relatividad especial 688

Simultaneidad 690

Espacio-tiempo 690

Dilatación del tiempo 692

Animación del viaje del gemelo 696

Suma de velocidades 702

Viaje espacial 703

Contracción de la longitud 706

Cantidad de movimiento relativista 708

Masa, energía y $E = mc^2$ 709

El principio de correspondencia 713

36 Teoría de la relatividad general 720

Principio de equivalencia 720

Flexión de la luz por la gravedad 722

Gravedad y tiempo: corrimiento gravitacional al rojo 724

Gravedad y espacio: movimiento de Mercurio 727

Gravedad, espacio y una nueva geometría 727

Ondas gravitacionales 730

Gravitación según Newton y según Einstein 730

Epílogo 735**Apéndice A: sistemas de medida 737**

Sistema común en Estados Unidos 737

Sistema Internacional 737

Metro 738*Kilogramo* 739*Segundo* 739*Newton* 739*Joule* 739*Ampere* 739*Kelvin* 739*Área* 740*Volumen* 740

Notación científica 740

Apéndice B: más acerca del movimiento 741

Cálculo de la velocidad y la distancia recorrida en un plano inclinado 741

Cálculo de la distancia cuando la aceleración es constante 743

Apéndice C: trazado de gráficas 745

Gráficas: una forma de expresar relaciones cuantitativas 745

Gráficas cartesianas 745

Pendiente y área bajo la curva 747

Trazado de gráficas con física conceptual 747

Apéndice D: más acerca de vectores 749

Vectores y escalares 749

Suma de vectores 749

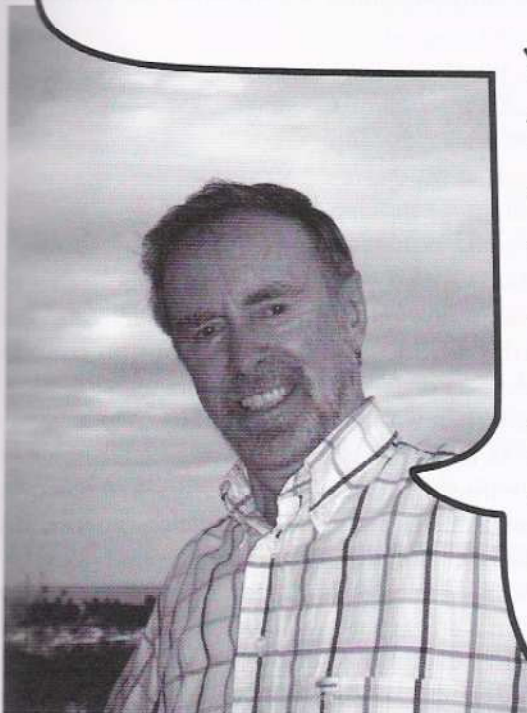
Determinación de componentes de vectores 750

Botes de vela 752

Apéndice E: crecimiento exponencial y tiempo de duplicación 755**Glosario 761****Créditos de fotografías 778****Índice 781**

Al estudiante

Sabes que no puedes disfrutar un juego si no conoces sus reglas, ya sea de pelota, de computadora o tan sólo de mesa. Asimismo, no apreciarás bien tu entorno hasta que comprendas las reglas de la naturaleza. La física es el estudio de tales reglas, que te enseñarán la manera tan bella en que se relaciona todo en la naturaleza. Entonces, la razón principal para estudiar la física es ampliar la forma en que observas el mundo que te rodea. Verás la estructura matemática de la física en diversas ecuaciones: más que recetas de cálculo, verás esas ecuaciones como *guías para pensar*.



Yo disfruto de la física y tú también lo harás, porque la comprenderás. Si te enganchas y tomas tus clases con regularidad, entonces podrás enfocarte hacia los problemas matemáticos. Intenta comprender los conceptos y si después vienen los cálculos, los entenderás y resolverás fácilmente.

¡Disfruta la física!

PAUL G. HEWITT

Al profesor

La secuencia de capítulos en esta décima edición es idéntica a la de la edición anterior. Además de los textos exhaustivos que conforman los capítulos, hay nuevo material al final de cada uno, muchas nuevas fotografías y otras características novedosas que se describen a continuación.

Al igual que en la edición anterior, el capítulo 1, “Acerca de la ciencia”, da inicio a su curso de forma muy positiva con la cobertura sobre las primeras mediciones de la Tierra y de las distancias a la Luna y el Sol.

La primera parte, “Mecánica”, comienza con el capítulo 2, que, al igual que en la edición anterior, presenta una breve revisión histórica de Aristóteles y Galileo, la primera ley de Newton y el equilibrio mecánico. La intensidad del capítulo 1 se mantiene al ocuparse de las fuerzas antes que de la velocidad y la aceleración. Los alumnos tendrán su primer acercamiento a la física a través de un tratamiento exhaustivo de los vectores de fuerzas paralelas. Entrarán así a la confortable parte de la física antes de estudiar la cinemática.

El capítulo 3, “Movimiento rectilíneo”, es el único capítulo de la primera parte que no incluye leyes de física. La cinemática carece de leyes, sólo tiene definiciones, principalmente para rapidez, velocidad y aceleración, que son quizá los conceptos menos excitantes que ofrecerá su curso. Con frecuencia, la cinemática se convierte en el “agujero negro” de la enseñanza, pues se le dedica mucho tiempo y, a cambio, ofrece poca física. Al ser más de naturaleza matemática que física, las ecuaciones cinemáticas tal vez parezcan las más intimidantes en este libro para el estudiante. Aunque una mirada experimentada seguramente no verá esto, es probable que sus *alumnos* las vean así:

$$\zeta = \zeta_0 + \delta\theta$$

$$\zeta = \zeta_0\theta + \frac{1}{2}\delta\theta^2$$

$$\zeta^2 = \zeta_0^2 + 2\delta\zeta$$

$$\zeta_\alpha = \frac{1}{2}(\zeta_0 + \zeta)$$

Si usted desea que haya deserciones de su curso, presente estas ecuaciones en el primer día de clases y anuncie a sus alumnos que la mayor parte del esfuerzo durante el curso estará dedicado a darles sentido. ¿No sucede lo mismo cuando utilizamos los signos convencionales de esas ecuaciones?

Pregúntele a cualquier graduado universitario lo siguiente: ¿Cuál es la aceleración de un objeto en caída libre? ¿Qué es lo que conserva caliente el interior de la Tierra? Usted se dará cuenta dónde se enfocó la educación; obtendrá muchas más respuestas correctas a la primera pregunta que a la segunda. Tradicionalmente, los cursos de física se ocupan demasiado de la cinemática y hacen una escasa cobertura (si es que acaso hacen alguna) de la física moderna. El decaimiento radiactivo casi nunca obtiene la atención que se otorga a los cuerpos en caída. Así que mi recomendación es estudiar rápidamente por el capítulo 3, dejando clara la distinción entre velocidad y aceleración, y luego pasar al capítulo 4, “Segunda ley de Newton”, donde los conceptos de velocidad y aceleración encuentran su aplicación.

El capítulo 5 continúa con la “tercera ley de Newton del movimiento”. El final del capítulo está dedicado a la regla del paralelogramo para sumar vectores (primero vectores de fuerza y luego de velocidad). También se presentan los componentes vectoriales. Más sobre este tema se encontrará en el apéndice D, y especialmente en el libro *Practicing Physics*.

El capítulo 6, "Cantidad de movimiento", es una extensión lógica de la tercera ley de Newton. Una razón por la que prefiero enseñar este tema antes que el de energía es que para los estudiantes es más fácil comprender mv que $\frac{1}{2}mv^2$. Otra razón para estudiar primero la cantidad de movimiento es que los vectores del capítulo anterior se emplean en este tema y no en el de energía.

El capítulo 7, "Energía", es un capítulo más largo, enriquecido con ejemplos cotidianos y con temas de actualidad relacionados. La energía es un asunto central en la mecánica, de manera que este capítulo incluye un gran número de ejercicios (70) al final. Trabajo, energía y potencia también reciben una amplia cobertura en el libro *Practicing Physics*.

Después de los capítulos 8 y 9 (sobre el movimiento de rotación y la gravedad), la parte de mecánica culmina con el capítulo 10 (sobre el movimiento de los proyectiles y de satélites). Los estudiantes estarán fascinados de aprender que cualquier proyectil que se mueve suficientemente rápido puede convertirse en un satélite de la Tierra, y que, si se mueve aún más rápido, podría convertirse en un satélite del Sol. El movimiento de los proyectiles y el de los satélites están estrechamente relacionados.

La segunda parte, "Propiedades de la materia", comienza con un nuevo capítulo sobre átomos, que recoge buena parte del tratamiento histórico de la edición anterior, en un tratamiento ampliado de los átomos y los cuantos.

Las partes 3 a 8 se enriquecen, al igual que las dos primeras, con ejemplos de la tecnología actual.

Esta edición conserva los recuadros con breves textos sobre asuntos como energía y tecnología, las ruedas de los trenes, las bandas magnéticas en las tarjetas de crédito y los trenes de levitación magnética. También aparecen recuadros sobre pseudociencia, el poder de los cristales, el efecto placebo, búsqueda de mantos de agua con métodos de radiestesia, terapia magnética, ondas electromagnéticas alrededor de líneas de energía eléctrica y la fobia hacia la radiación en los alimentos y hacia cualquier objeto que ostente el adjetivo "nuclear". Para cualquier persona que trabaja en el área de la ciencia, y sabe acerca del cuidado, las revisiones y verificaciones que se requieren para comprender algo, estas preocupaciones y malos entendidos son risibles. Pero para aquellos que no trabajan en el campo científico, incluyendo a sus mejores alumnos, la pseudociencia parece convincente cuando sus difusores revisten sus argumentos con el lenguaje científico mientras pasan por alto con destreza los principios de la ciencia. Deseo que estos recuadros ayuden a detener esta ola creciente.

Una nueva característica de esta edición es la sección "Cálculos de un paso", que es un conjunto de problemas de sustitución simple que requieren de soluciones precisamente de un solo paso. Esta sección está presente en los capítulos que contienen más ecuaciones. Los alumnos se familiarizarán con las ecuaciones al tener que sustituir los valores numéricos. En los conjuntos de problemas se presentan más desafíos matemáticos y físicos. Los problemas van precedidos de ejercicios cualitativos, y en cada capítulo se presenta un promedio de 10 nuevos problemas.

Los recuadros ¡Eureka!, que aparecen al margen de muchas páginas, son una novedad de esta edición. Cada página de un libro de texto introductorio debe contener información que incite al cerebro. Los recuadros ¡Eureka! tienen ese cometido.

Para ayudarle con sus presentaciones en clase, hemos creado un nuevo material para el instructor titulado *The Conceptual Physics Lecture Launcher*. Este CD-ROM ofrece valiosas herramientas de presentación que le ayudarán a hacer sus clases más amenas y dinámicas. Incluye más de 100 videos cortos de mis demostraciones favoritas, más de 130 aplicaciones interactivas desarrolladas de manera específica para ayudarle a ilustrar conceptos especialmente difíciles, y cuestiona-

rios de aplicación semanal que repasan capítulo por capítulo (en PPT) para utilizarse con los Sistemas de respuesta en clase (sistemas de encuestas fáciles de usar que le permiten plantear preguntas en clase, hacer que cada estudiante vote y luego desplegar los resultados y discutirlos en tiempo real). *The Conceptual Physics Lecture Launcher* también presenta todas las imágenes del libro (en alta resolución) y el *Manual del instructor* en formato editable de Word.

Como un recurso de ayuda para sus alumnos fuera de clase, existe el elogiado sitio Web, disponible en <http://www.physicsplace.com>, que ahora incluye todavía más recursos. El sitio The Physics Place es el más avanzado desde el punto de vista educativo, más difundido y mejor calificado por los estudiantes que toman este curso. El sitio mejorado ahora ofrece más de los tutoriales *on line* interactivos favoritos de los estudiantes (que cubren temas que muchos de ustedes solicitaron), y una nueva librería de figuras interactivas (figuras clave de cada capítulo del libro que se comprenden mejor a través de la experimentación interactiva gracias a la escala, geometría, evolución del tiempo o representación múltiple). También se incluyen exámenes, flash cards y otros recursos específicos para cada capítulo.

Todos estos medios *on line* novedosos, dirigidos y efectivos se podrán integrar fácilmente a su curso utilizando un nuevo libro de calificación en versión electrónica (que le permitirá "asignar" los tutoriales, exámenes y otras actividades como tareas para resolver en casa o como proyectos que automáticamente se califican y registran), iconos del libro (que destacan para usted y para sus alumnos tutoriales clave, figuras interactivas y otros recursos *on line*), y el CD-ROM *The Conceptual Physics Lecture Launcher*. Una nueva sección titulada Online Resources en el Physics Place resume los medios disponibles para usted y para sus alumnos, capítulo por capítulo y semana por semana.

Para mayor información sobre el material de apoyo, consulte el sitio <http://www.aw-bc.com/physics> o póngase en contacto con su representante de Pearson Educación o conmigo directamente en Pghewitt@aol.com.

Agradecimientos

Estoy profundamente agradecido con Ken Ford por revisar esta edición para darle mayor precisión y por sus numerosas e ilustrativas sugerencias. Desde hace muchos años admiro los libros de Ken, uno de los cuales, *Basic Physics*, me inspiró para escribir Física conceptual. Hoy me siento honrado de que él haya dado buena parte de su tiempo y de su energía para contribuir a que esta edición sea la mejor. Después de que se entrega un manuscrito, invariablemente surgen errores, así que asumo por completo la responsabilidad por cualquier error que haya sobrevivido a su escrutinio.

Agradezco a Diane Riendeau por su amplia retroalimentación. Por sus valiosas sugerencias, doy las gracias a mis amigos Dean Baird, Howie Brand, George Curtis, Marshall Ellenstein, Mona El Tawil-Nassar, Jim Hicks, John Hubisz, Dan Johnson, Fred Myers, Kenn Sherey, Chuck Stone, Pablo Robinson y Phil Wolf. Agradezco las sugerencias de Matthew Griffiths, Paul Hammer, Francisco Izaguirre, Les Sawyer, Dan Sulke, Richard W. Tarara y Lawrence Weinstein. Agradezco también el gran ingenio de mis amigos y colegas del Exploratorium: Judith Brand, Paul Doherty, Ron Hipschman y Modesto Tamez. Por las fotografías, agradezco a mi hermano Dave Hewitt, a mi hijo Paul Hewitt y a Keith Bardin, Burl Grey, Lillian Lee Hewitt, Will Maynez, Milo Patterson, Jay Pasachoff y David Willey. Por fortalecer el banco de pruebas, doy las gracias a Herb Gottlieb.

Me siento en deuda con los autores de libros que inicialmente sirvieron como influencia y referencia desde hace muchos años: Theodore Ashford, *From Atoms to Stars*; Albert Baez, *The New College Physics: A Spiral Approach*; John N. Cooper y Alpheus W. Smith, *Elements of Physics*; Richard P. Feynman, *The Feynman Lectures on Physics*; Kenneth Ford, *Basic Physics*; Eric Rogers, *Physics for the Inquiring Mind*; Alexander Taffel, *Physics: Its Methods and Meanings*; UNESCO, *700 Science Experiments for Everyone*; y Harvey E. White, *Descriptive College Physics*. Por ésta y la edición anterior, estoy agradecido con Bob Park, cuyo libro *Voodoo Science* me motivó a incluir los recuadros sobre pseudociencia.

Por el material auxiliar Resolución de problemas en Física conceptual, escrito en colaboración con Phil Wolf, ambos agradecemos a Tsing Bardin, Howie Brand, George Curtis, Ken Ford, Herb Gottlieb, Jim Hicks, David Housden, Chelcie Liu, Fred Myers, Stna Schiocchio, Diane Riendeau y David Williamson por su valiosa retroalimentación.

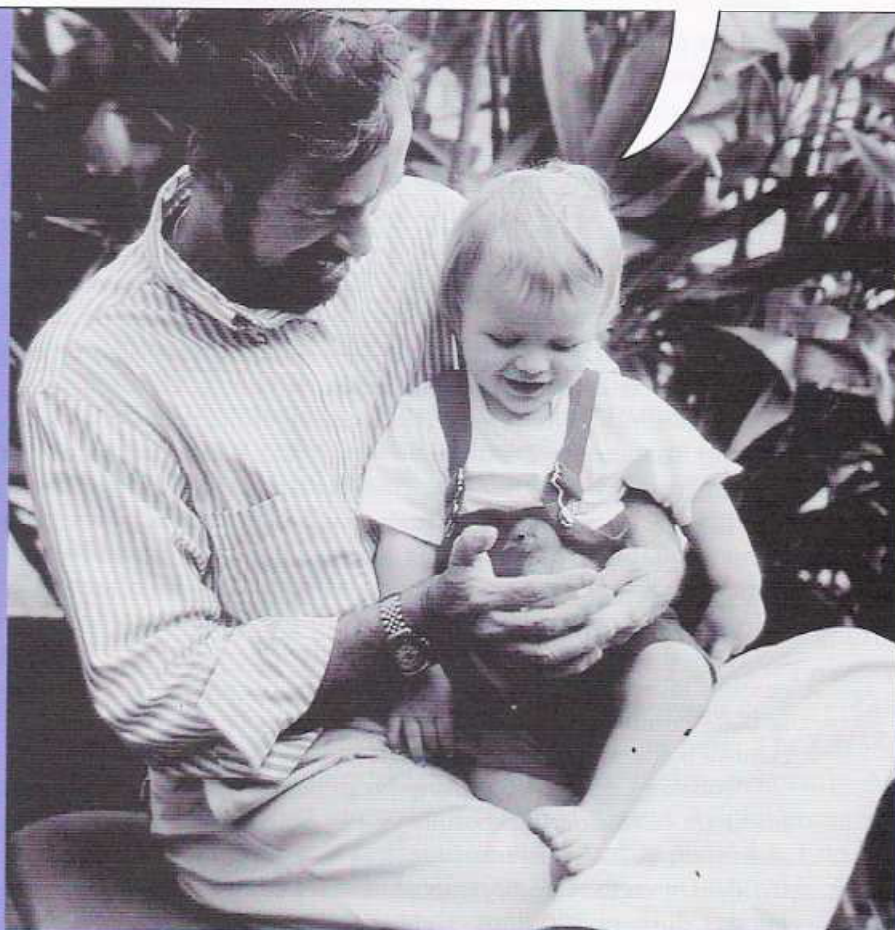
Me siento especialmente agradecido con mi esposa, Lillian Lee Hewitt, por su asistencia en todas las fases de la preparación del libro y el material auxiliar. También agradezco a mi sobrina Gretchen Hewitt Rojas por su trabajo de transcripción del material. Gracias a mi amigo de toda la vida Ernie Brown por el diseño del logotipo de física y por los encabezados de los capítulos en el libro de nuevos problemas.

Por su dedicación en esta edición, doy las gracias al equipo de Addison Wesley en San Francisco. Estoy especialmente agradecido con Liana Allday y el editor en jefe Adam Black. También con Ira Kleinberg por obtener nuevo material fotográfico. Dedico una nota de aprecio a Claire Masson por los componentes del ciberespacio para ésta y la edición anterior. Agradezco a David Vasquez,

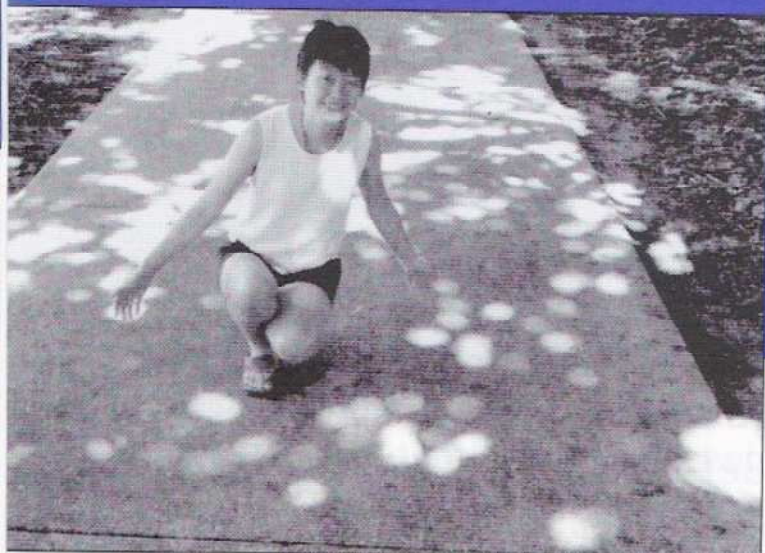
mi querido amigo de muchos años, por su ilustrativa asesoría. Y agradezco también a todo el equipo de producción de Techbooks GTS por su paciencia con mis cambios de último minuto. Realmente, ¡fui bendecido con un equipo de primer nivel!

Paul G. Hewitt
Saint Petersburg, Florida

¡Caramba, tío abuelo Paul! Antes de que este pollito agotara sus recursos espaciales internos y saliera de su cascarón, debió haber pensado que le había llegado su hora. Pero lo que parecía su final fue un nuevo comienzo. ¿Qué ya estaremos listos, como los pollitos, para entrar a un ambiente nuevo y a una nueva comprensión acerca de nuestro lugar en el Universo?



Acerca de la ciencia



Las manchas circulares de luz que rodean a Lillian son imágenes del Sol, originadas por pequeñas aberturas entre las hojas de un árbol. Durante un eclipse parcial, las manchas tienen la forma de Luna creciente.

En primer lugar, la ciencia es el cuerpo de conocimientos que describe el orden dentro de la naturaleza y las causas de ese orden. En segundo lugar, la ciencia es una actividad humana continua que representa los esfuerzos, los hallazgos y la sabiduría colectivos de la raza humana, es decir, se trata de una actividad dedicada a reunir conocimientos acerca del mundo, y a organizarlos y condensarlos en leyes y teorías demostrables. La ciencia se inició antes que la historia escrita, cuando los seres humanos descubrieron regularidades y relaciones en la naturaleza, como la disposición de las estrellas en el cielo nocturno, y las pautas climáticas, cuando se iniciaba la estación de lluvias, o cuando los días eran más largos. A partir de tales regularidades la gente aprendió a hacer predicciones que les permitían tener algo de control sobre su entorno.

La ciencia tuvo grandes progresos en Grecia, en los siglos III y IV A. C. Se difundió por el mundo mediterráneo. El avance científico casi se detuvo en Europa, cuando el Imperio Romano cayó en el siglo V D. C. Las hordas bárbaras destruyeron casi todo en su ruta por Europa, y así comenzó la llamada Edad del Oscurantismo. En esa época, los chinos y los polinesios cartografiaban las estrellas y los planetas, en tanto que las naciones árabigas desarrollaban las matemáticas y aprendían a producir vidrio, papel, metales y diversas sustancias químicas. Gracias a la influencia islámica la ciencia griega regresó a Europa, la cual penetró en España durante los siglos X al XII. De esta manera, en el siglo XIII, surgieron universidades en Europa y la introducción de la pólvora cambió la estructura sociopolítica del viejo continente en el siglo XIV. El siglo XV vivió la bella combinación de arte y ciencia lograda por Leonardo da Vinci. El pensamiento científico fue impulsado en el siglo XVI con la invención de la imprenta.

Nicolás Copérnico, astrónomo polaco del siglo XVI causó gran controversia al publicar un libro donde proponía que el Sol era estacionario y que la Tierra giraba a su alrededor. Tales ideas eran opuestas a la creencia popular de que la Tierra era el centro del Universo, y como eran contrarias a las enseñanzas de la Iglesia, estuvieron prohibidas durante 200 años. Galileo Galilei, físico italiano, fue arrestado por divulgar la teoría de Copérnico y sus propias contribuciones al pensamiento científico. No obstante, un siglo después fueron aceptados quienes defendieron las ideas de Copérnico.

Esta clase de ciclos suceden una era tras otra. A principios del siglo XIX, los geólogos enfrentaron una violenta condena porque sus posturas diferían de la explicación de la creación dada por el Génesis. Después, en el mismo siglo, la geología fue aceptada, aunque las teorías de la evolución siguieron condenadas, y se prohibió su enseñanza. Cada era ha tenido grupos de rebeldes intelectuales, quienes fueron condenados y a veces perseguidos en su tiempo; pero después se les consideraría inofensivos y a menudo esenciales para el mejoramiento de las condiciones humanas. "En cada en-

crucijada del camino que lleva hacia el futuro, a cada espíritu progresista se le oponen mil individuos asignados para defender el pasado.”¹

Mediciones científicas

El distintivo de una buena ciencia es la medición. Lo que conozcas acerca de algo suele relacionarse con lo bien que puedas medirlo. Así lo enunció acertadamente Lord Kelvin, famoso físico del siglo XIX: “Con frecuencia digo que cuando puedes medir algo y expresarlo en números, quiere decir que conoces algo acerca de ello. Cuando no lo puedes medir, cuando no lo puedes expresar en números, tu conocimiento es insuficiente y poco satisfactorio. Puede ser el comienzo de un conocimiento, pero en cuanto tu pensamiento, apenas has avanzado para llegar a la etapa de la ciencia, cualquiera que ésta sea.” Las mediciones científicas no son algo nuevo, sino que se remontan a la Antigüedad. Por ejemplo, en el siglo III A. C., se realizaron mediciones bastante exactas de los tamaños de la Tierra, la Luna y el Sol, así como de las distancias entre ellos.

El tamaño de la Tierra

En Egipto fue donde Eratóstenes, geógrafo y matemático, midió por primera vez la circunferencia de la Tierra, aproximadamente en el año 235 A. C.² La calculó de la siguiente manera: sabía que el Sol estaba en la máxima altura del cielo a mediodía del 22 de junio, el solsticio de verano. En ese momento, una estaca vertical proyecta una sombra de longitud mínima. Si el Sol está directamente arriba, una estaca vertical no dará sombra alguna, y eso sucede en el solsticio de verano en Siena, una ciudad al sur de Alejandría (donde en la actualidad se encuentra la represa de Asuán). Eratóstenes sabía que el Sol estaba directamente arriba de Siena por información que obtuvo en la biblioteca, la cual le indicaba que en este único momento la luz solar entra verticalmente a un pozo profundo en Siena y se refleja en su fondo. Eratóstenes razonó que si los rayos del Sol se prolongaran en esa dirección, llegarían al centro de la Tierra. Asimismo, una recta vertical que penetrara en la Tierra en Alejandría (o en algún otro lugar) también pasaría por el centro de la Tierra.

A mediodía del 22 de junio, Eratóstenes midió la sombra proyectada por una columna vertical en Alejandría, y vio que era la octava parte de la altura de la columna (figura 1.1). Esto corresponde a un ángulo de 7.2 grados entre los rayos del Sol y la vertical de la columna. Como 7.2° es igual a la 7.2/360 o 1/50 parte de un círculo, entonces Eratóstenes dedujo que la distancia entre Alejandría y Siena debía ser 1/50 de la circunferencia de la Tierra. Así, la circunferencia de la Tierra es 50 veces mayor que la distancia entre ambas ciudades. Esta distancia, que era muy llana y se recorría con frecuencia, se midió y resultó de 5000 estadios (800 kiló-

¹ De *Our Social Duty*, del conde Maurice Maeterlinck.

² Eratóstenes era el segundo bibliotecario de la Universidad de Alejandría, en Egipto, que fue fundada por Alejandro Magno. Eratóstenes era uno de los sabios más destacados de su época y escribió sobre filosofía, ciencia y literatura. Como matemático inventó un método para encontrar los números primos. Era inmensa su celebridad entre sus contemporáneos: Arquímedes le dedicó uno de sus libros. Como geógrafo escribió *Geography*, el primer libro en ofrecer las bases matemáticas para esta disciplina, y en considerar que la Tierra es como un globo dividido en zonas antárticas, templadas y tórridas. Durante mucho tiempo se consideró la obra de referencia, y fue usada un siglo después por Julio César. Eratóstenes pasó la mayor parte de su vida en Alejandría, lugar donde murió en el año 195 A. C.

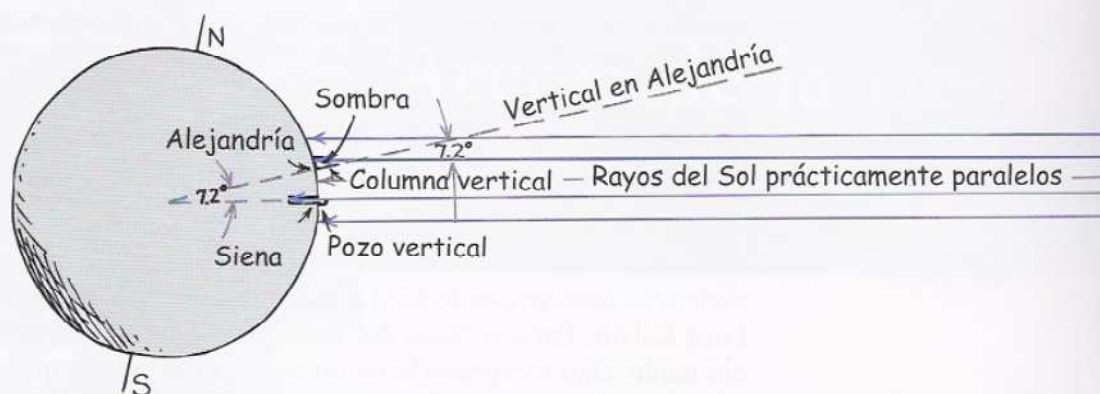


FIGURA 1.1

Cuando el Sol está directamente arriba de Siena no está directamente arriba de Alejandría, a 800 km al norte. Cuando los rayos solares caen directamente a un pozo vertical en Siena, proyectan una sombra de una columna vertical en Alejandría. Las verticales en ambos lugares se prolongan hasta el centro de la Tierra, y tienen el mismo ángulo que forman los rayos del Sol con la columna en Alejandría. Eratóstenes midió este ángulo, y vio que abarcaba $1/50$ de un círculo completo. Por consiguiente, la distancia de Alejandría a Siena es $1/50$ de la circunferencia terrestre. (También, la sombra producida por la columna tiene $1/8$ de la altura de la misma, y eso quiere decir que la distancia entre ambos lugares es $1/8$ del radio de la Tierra.)

metros). Así fue como Eratóstenes calculó que la circunferencia de la Tierra debía ser 50×5000 estadios = 250,000 estadios. Esto coincide, dentro de un 5%, con el valor aceptado en la actualidad para la circunferencia de la Tierra.

Se obtiene el mismo resultado pasando por alto los grados, y comparando la longitud de la sombra proyectada por la columna con la altura de la misma. Se demuestra en geometría que, con mucha aproximación, la relación *longitud de la sombra/altura de 1a columna* es igual que la relación de la *distancia entre Alejandría y Siena/radio de la Tierra*. De manera que como la columna es 8 veces mayor que su sombra, el radio de la Tierra debe ser 8 veces mayor que la distancia de Alejandría a Siena.

Como la circunferencia de un círculo es 2π multiplicada por su radio ($C = 2\pi r$), el radio de la Tierra simplemente es su circunferencia dividida entre 2π . En unidades modernas, el radio de la Tierra es 6,370 kilómetros, y su circunferencia es 40,000 km.

El tamaño de la Luna

Quizá Aristarco fue quien primero sugirió que la Tierra giraba diariamente en torno a un eje y que eso explicaba el movimiento diario de las estrellas. También supuso que la Tierra giraba en torno al Sol en órbita anual, y que los demás planetas hacen lo mismo.³ Midió en forma correcta el diámetro de la Luna y su dis-

³ Aristarco no estaba seguro de su hipótesis heliocéntrica quizá porque las estaciones en la Tierra son diferentes y no apoyaban la idea de que la Tierra describe un círculo en torno al Sol. Lo más importante es que notó que la distancia de la Luna a la Tierra varía, lo cual es una evidencia clara de que la Luna no realiza un círculo perfecto en torno a la Tierra. Si sucede así, era difícil sostener que la Tierra sigue una trayectoria circular en torno al Sol. La explicación, con trayectorias elípticas de los planetas, no fue descubierta sino varios siglos después por Johannes Kepler. Mientras tanto, los epiciclos propuestos por otros astrónomos explicaban esas discrepancias. Es interesante suponer cómo habría sido el desarrollo de la astronomía si la Luna no existiera. Su órbita irregular no habría contribuido a la temprana decadencia de la teoría heliocéntrica; que pudo haberse establecido varios siglos antes.

tancia a la Tierra. Esto fue más o menos en el año 240 A. C., siete siglos antes de que sus hallazgos tuvieran aceptación completa.

Aristarco comparó el tamaño de la Luna con el de la Tierra observando un eclipse de Luna. La Tierra, como cualquier otro cuerpo expuesto a la luz solar, proyecta una sombra. Un eclipse de Luna es simplemente el evento en el que la Luna pasa por esta sombra. Aristarco estudió detenidamente ese evento y determinó que el ancho de la sombra de la Tierra en la Luna era 2.5 veces el diámetro de la Luna, lo cual parecía indicar que el diámetro de la Luna era 2.5 veces menor que el de la Tierra. Sin embargo, como el tamaño del Sol es gigantesco, la sombra de la Tierra es cónica, como se observa durante un eclipse de Sol. (La figura 1.2 muestra lo anterior en una escala exagerada.) En ese momento, la Tierra intercepta apenas la sombra de la Luna, la cual disminuye su diámetro hasta ser casi un punto en la superficie terrestre, prueba de que la conicidad (disminución del diámetro) de tal sombra a esa distancia es un diámetro de la Luna. Entonces, durante un eclipse lunar, la sombra de la Tierra, después de recorrer la misma distancia, también debe disminuir un diámetro de la Luna. Si se tiene en cuenta la conicidad producida por los rayos solares, el diámetro de la Tierra debe ser $(2.5 + 1)$ diámetros de la Luna. De este modo Aristarco demostró que el diámetro de la Luna es $1/3.5$ del diámetro terrestre. El diámetro de la Luna que

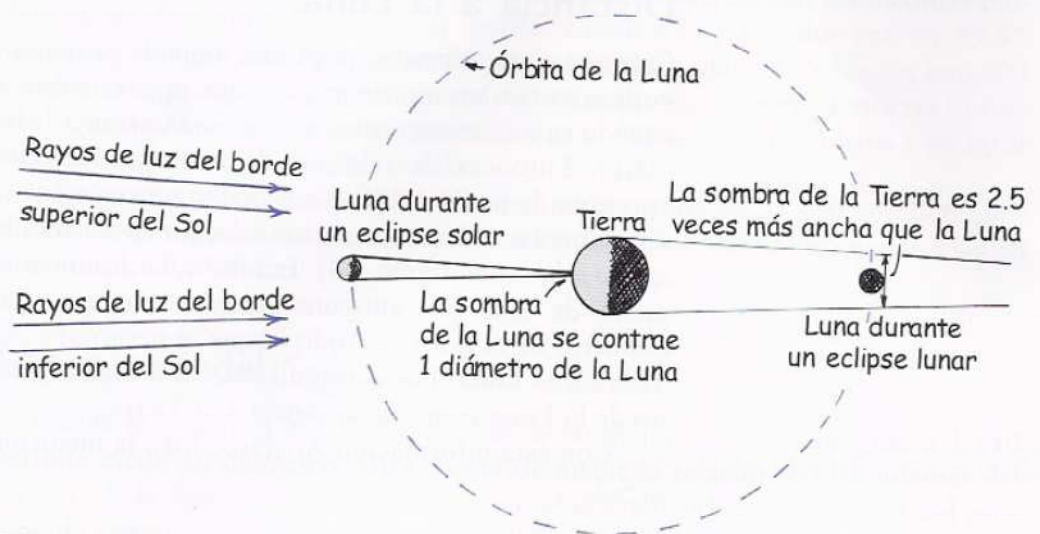


FIGURA 1.2

Durante un eclipse lunar, se observa que la sombra de la Tierra es 2.5 veces más ancha que el diámetro de la Luna. Como el tamaño del Sol es enorme, la sombra de la Tierra debe ser cónica. La magnitud de la conicidad es evidente durante un eclipse solar, cuando la sombra de la Luna se contrae todo el diámetro entre la Luna y la Tierra. Entonces, la sombra de la Tierra disminuye la misma cantidad en la misma distancia. Por lo tanto, el diámetro de la Tierra debe ser 3.5 veces el diámetro de la Luna.

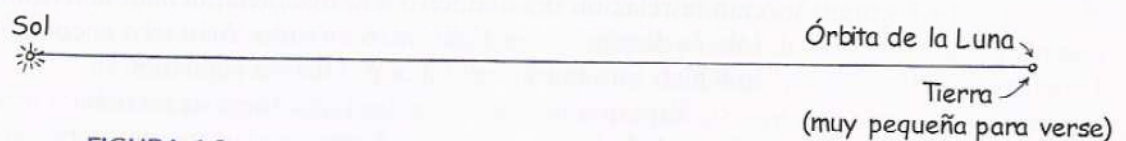
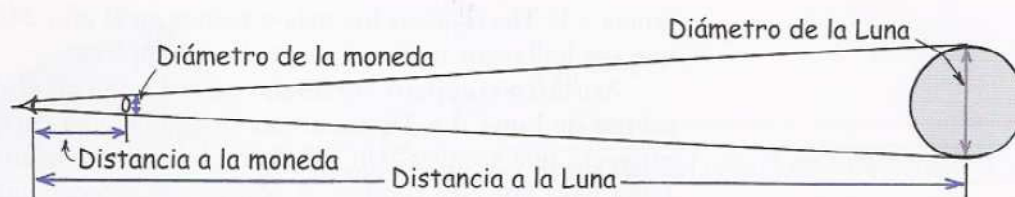


FIGURA 1.3

Los eclipses de Sol y de Luna en escala correcta, donde se observa por qué los eclipses son poco frecuentes. (Son más raros todavía porque la órbita de la Luna en torno a la Tierra está inclinada unos 5° respecto a la órbita de la Tierra en torno al Sol.)



$$\frac{\text{Diámetro de la moneda}}{\text{Distancia a la moneda}} = \frac{\text{Diámetro de la Luna}}{\text{Distancia a la Luna}} = \frac{1}{110}$$

FIGURA 1.4

Ejercicio con relaciones: Cuando la moneda apenas “eclipsa” la Luna, el diámetro de la moneda entre la distancia de tu ojo y la moneda es igual al diámetro de la Luna entre la distancia de ti y la Luna (no está a escala aquí). Estas mediciones dan como resultado una razón de 1/110 en ambos casos.

se acepta actualmente es 3640 km, que coincide dentro de un 5% con el calculado por Aristarco.

Distancia a la Luna

Con una cinta adhesiva, pega una moneda pequeña en el vidrio de una ventana, y observa con un ojo de manera que apenas cubra a la Luna llena. Esto sucede cuando tu ojo, se encuentra aproximadamente a 110 diámetros de la moneda, del vidrio. Entonces, la relación *diámetro de moneda/distancia a la moneda* es aproximadamente 1/110. Con deducciones geométricas que emplean triángulos semejantes se demuestra que esa relación también es la de *diámetro de la Luna/distancia a la Luna* (figura 1.4). Entonces, la distancia a la Luna es 110 veces el diámetro de ésta. Los antiguos griegos lo sabían. La medición de Aristarco del diámetro de la Luna era todo lo que se necesitaba para calcular la distancia de la Tierra a la Luna. Por consiguiente, los antiguos griegos conocían tanto el tamaño de la Luna como su distancia a la Tierra.

Con esta información Aristarco hizo la medición de la distancia de la Tierra al Sol.

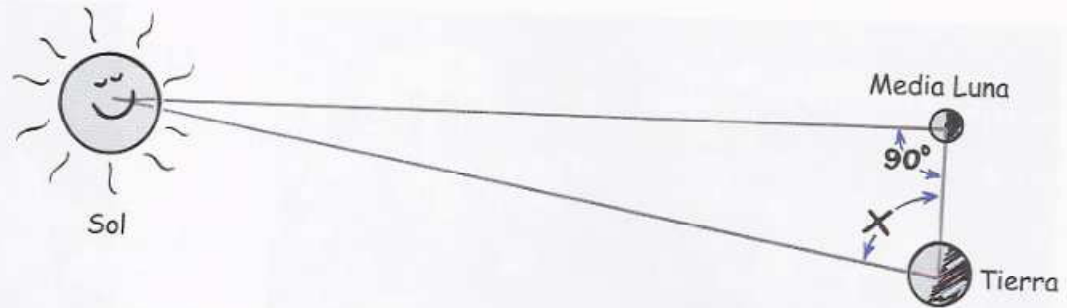
Distancia al Sol

Si repitieras el ejercicio de la moneda en la ventana y la Luna, esta vez con el Sol (lo cual sería peligroso, por su brillo), adivina qué sucedería: la relación de *diámetro del Sol/distancia al Sol* también es igual a 1/110. Esto se debe a que tanto el Sol como la Luna aparentemente tienen el mismo tamaño. Los dos abarcan el mismo ángulo (más o menos 0.5°). Entonces, aunque los antiguos griegos conocían la relación del diámetro a la distancia, debían determinar sólo el diámetro o sólo la distancia con algún otro método. Aristarco encontró una forma de hacerlo e hizo una burda estimación. Hizo lo siguiente.

Esperó a que la fase de la Luna fuera *exactamente* media Luna, estando visible el Sol al mismo tiempo. Entonces, la luz solar debe caer en la Luna formando ángulo recto con su línea de visión (visual). Esto quiere decir que las rectas entre la Tierra y la Luna, entre la Tierra y el Sol, y entre la Luna y el Sol forman un triángulo rectángulo (figura 1.5).

FIGURA 1.5

Cuando la Luna se ve exactamente como media Luna, el Sol, la Luna y la Tierra forman un triángulo rectángulo (aquí no está a escala). La hipotenusa es la distancia de la Tierra al Sol. Con operaciones trigonométricas sencillas, es posible calcular la hipotenusa de un triángulo rectángulo si se conoce alguno de los ángulos no rectos y alguno de los catetos. La distancia de la Tierra a la Luna es un cateto conocido. Si mides el ángulo X puedes calcular la distancia de la Tierra al Sol.



La trigonometría establece que si conoces todos los ángulos de un triángulo rectángulo y la longitud de cualesquiera de sus lados, puedes calcular la longitud de cualquier otro lado. Aristarco conocía la distancia de la Tierra a la Luna. En el momento de la media Luna, también conocía uno de los ángulos, 90° . Todo lo que debía hacer era medir el segundo ángulo entre la visual a la Luna y la visual al Sol. El tercer ángulo, que es muy pequeño, es 180° menos la suma de los dos primeros ángulos (ya que la suma de los ángulos de cualquier triángulo es igual a 180°).

Es difícil medir el ángulo entre las visuales a la Luna y al Sol, sin tener un tránsito (teodolito) moderno. Por un lado, tanto el Sol como la Luna no son puntos, sino que tienen un tamaño relativamente grande. Aristarco tuvo que ver hacia sus centros (o hacia alguna de sus bordes) y medir el ángulo entre ellos, que es muy grande, ¡casi también un ángulo recto! De acuerdo con las medidas modernas, su determinación fue muy burda. Midió 87° y el valor real es 89.8° . Calculó que el Sol está 20 veces más lejos que la Luna cuando, de hecho, está 400 veces más lejos. Así, aunque su método era ingenioso, sus mediciones no lo fueron. Quizás Aristarco encontró increíble que el Sol estuviera tan lejos y su error fue del lado más cercano. No se sabe.

En la actualidad se sabe que el Sol está a un promedio de 150,000,000 kilómetros. Está un poco más cerca en diciembre (a 147,000,000 km) y más lejos en junio (152,000,000 km).

El tamaño del Sol

Conocida la distancia al Sol, la relación de su diámetro/distancia igual a $1/110$ permite medir su diámetro. Otra forma de medir la relación $1/110$, además del método de la figura 1.4, consiste en medir el diámetro de la imagen del Sol proyectada por una abertura hecha con un alfiler. Debes intentarlo. Haz un agujerito en una hoja de cartulina opaca y deja que la luz solar pase por el agujero. La imagen redonda que se forma en una superficie tras el cartón es en realidad una imagen del Sol. Verás que el tamaño de la imagen no depende del tamaño del agujero, sino de lo alejado que está de la imagen. Los agujeros grandes forman imágenes más brillantes, pero no más grandes. Claro que si el diámetro del agujero es muy grande no se formará ninguna imagen. Con mediciones cuidadosas verás que la relación del tamaño de la imagen al agujero de alfiler es $1/110$: igual que la relación *diámetro del Sol/distancia de la Tierra al Sol* (figura 1.6).

Es interesante que cuando hay un eclipse parcial de Sol, la imagen proyectada por el agujerito del alfiler tendrá forma de Luna creciente: ¡la misma que la del Sol parcialmente cubierto! Esto permite contar con una interesante forma de contemplar un eclipse parcial sin mirar el Sol.

¿Has notado que las manchas de luz solar que ves en el piso, bajo los árboles, son perfectamente redondas cuando el Sol está directamente arriba, y que se vuelven elípticas cuando el Sol está bajo en el cielo? Son imágenes del Sol produ-

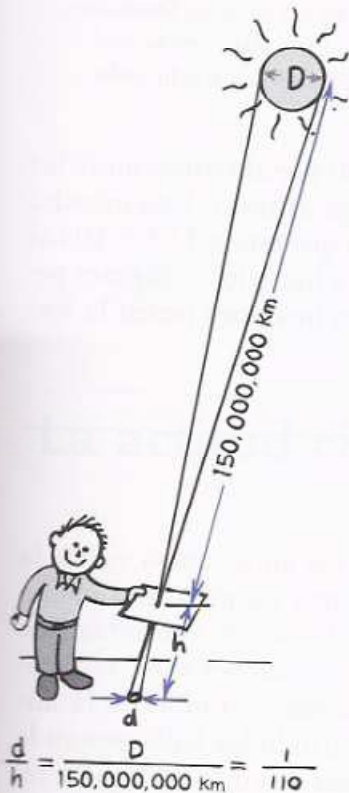


FIGURA 1.6

La mancha redonda de luz proyectada por el agujerito de alfiler es una imagen del Sol. La relación de su diámetro entre su distancia es igual que la relación del diámetro del Sol entre la distancia al Sol: $1/110$. El diámetro del Sol es $1/110$ de su distancia a la Tierra.



FIGURA 1.7

Renoir pintó con fidelidad las manchas de luz solar sobre los vestidos de sus personajes: imágenes del Sol proyectadas por aberturas relativamente pequeñas entre las hojas que están arriba de ellos.



FIGURA 1.8

Las manchas de luz solar en forma de Luna creciente son imágenes del Sol cuando está parcialmente eclipsado.

cidas por agujeritos de alfiler, cuando la luz llega pasando por aberturas entre las hojas, que son pequeñas en comparación con la distancia al suelo. Una mancha redonda de 10 cm de diámetro la proyecta una abertura que está a 110×10 cm del suelo. Los árboles altos producen imágenes grandes; y los bajos, imágenes pequeñas. Y en el momento de un eclipse solar parcial, las imágenes tienen la forma de Luna creciente (figura 1.8).

Matemáticas: el lenguaje de la ciencia

Desde que las matemáticas y la ciencia se integraron hace unos cuatro siglos, la ciencia y las condiciones de vida han progresado en forma asombrosa. Cuando las ideas de la ciencia se expresan en términos matemáticos, son concretas. Las ecuaciones de la ciencia son expresiones compactas de relaciones entre conceptos. No tienen los múltiples sentidos que con tanta frecuencia confunden la discusión de las ideas expresadas en lenguaje cotidiano. Cuando los hallazgos en la naturaleza se expresan matemáticamente, son más fáciles de comprobar o de rechazar usando experimentos. La estructura matemática de la física se hace evidente en muchas de las ecuaciones que encontrarás en este libro. Las ecuaciones son guías de razonamiento que demuestran las conexiones entre los conceptos de la naturaleza. Los métodos de las matemáticas y la experimentación han guiado a la ciencia hacia un éxito enorme.⁴

⁴ Distinguiremos entre la estructura matemática de la física y la práctica matemática de resolver problemas —que es el enfoque de la mayoría de los cursos no conceptuales. Nota la cantidad relativamente pequeña de problemas al final de los capítulos en este libro, en comparación con el número de ejercicios. La física conceptual antepone la comprensión a los cálculos. Problemas adicionales se encuentran en el manual *Problem Solving in Conceptual Physics*.

El método científico

No hay un solo método científico. Sin embargo, existen rasgos comunes en la manera en que trabajan los científicos. Esto nos lleva con el físico italiano Galileo Galilei (1564-1642) y el filósofo inglés Francis Bacon (1561-1626). Ellos se liberaron de los métodos de los griegos, quienes trabajaban “hacia adelante” o “hacia atrás”, dependiendo de las circunstancias, llegando así a conclusiones acerca del mundo físico mediante el razonamiento de suposiciones arbitrarias (axiomas). Los científicos actuales trabajan hacia delante, al examinar primero la manera en que el mundo realmente funciona y luego construyendo una estructura para explicar los hallazgos.

Aunque ninguna descripción del método científico del tipo receta de cocina resulta adecuada, es probable que algunos de los siguientes pasos, o todos, se encuentren en la forma en que la mayoría de los científicos realizan su trabajo.

1. Reconocer una pregunta o una duda: tal como un hecho inexplicado.
2. Hacer una conjetura educada, una **hipótesis**, de cuál podría ser la respuesta.
3. Predecir las consecuencias de la hipótesis.
4. Realizar experimentos o cálculos para comprobar las consecuencias pronosticadas.
5. Formular la regla general más sencilla que organice los tres elementos principales: hipótesis, efectos predichos y hallazgos experimentales.

Si bien estos pasos resultan atractivos, mucho del conocimiento científico proviene del ensayo y error, de la experimentación sin hipótesis o tan sólo de un descubrimiento accidental por una mente bien preparada. Sin embargo, más que un método en particular, el éxito de la ciencia tiene que ver con una actitud común de los científicos. Esa actitud es de interrogación, experimentación y humildad, es decir, la voluntad de admitir los errores.

La actitud científica

Es común considerar que un hecho es algo inmutable y absoluto. Pero en la ciencia un **hecho** suele ser una concordancia estrecha entre observadores capacitados, quienes hacen una serie de observaciones acerca del mismo fenómeno. Por ejemplo, cuando antes era un hecho que el Universo era inalterable y permanente, en la actualidad es un hecho que el Universo se está expandiendo y evolucionando. Por otra parte, una hipótesis científica es una conjetura educada que sólo se supone que será un hecho cuando la demuestren los experimentos. Cuando se haya probado una y otra vez una hipótesis y no se haya encontrado contradicción alguna, entonces puede transformarse en una **ley** o *principio*.

Si un científico encuentra pruebas que contradicen una hipótesis, ley o principio, de acuerdo con el espíritu científico será necesario cambiarla o abandonarla, independientemente de la reputación o autoridad de quienes la propusieron (a menos que se vea después que las pruebas contradictorias, al experimentarlas, resulten equivocadas, lo cual en ocasiones sucede). Por ejemplo, Aristóteles (384-322 A. C.), el filósofo griego tan admirado, afirmaba que un objeto cae con una velocidad proporcional a su peso. Esta idea se aceptó durante casi 2,000 años, tan sólo por la gran autoridad que tenía. Se dice que Galileo demostró la falsedad de tal afirmación con un experimento, donde demostraba que los objetos pesados y los ligeros, al dejarlos caer desde la Torre Inclinada de Pisa, lo hacían con



La experimentación, y no el debate filosófico, decide lo que es correcto en la ciencia.

¡EUREKA!

velocidades casi iguales. En el espíritu científico un solo experimento verificable que demuestre lo contrario vale más que cualquier autoridad, por reputada que sea o por el gran número de seguidores o partidarios que tenga. En la ciencia moderna tiene poco valor el argumentar, únicamente citando alguna autoridad.⁵

Los científicos deben aceptar sus hallazgos experimentales, aunque quisieran que fueran distintos. Deben tratar de distinguir entre lo que ven y lo que quieren ver porque, como la mayoría de las personas, tienen una capacidad vasta para engañarse a sí mismos.⁶ Las personas siempre han tendido a adoptar reglas, creencias, dogmas, ideas e hipótesis generales sin cuestionar detalladamente su validez, y a retenerlas mucho tiempo después de que se haya demostrado que carecen de sentido, que son falsas o cuando menos que son dudosas. Las hipótesis más extendidas son con frecuencia las menos cuestionadas. Lo más frecuente es que cuando se adopta una idea se presta atención especial a los casos que parecen respaldarla; en tanto que los que parecen refutarla se distorsionan, empujados o ignorados.

Los científicos usan la palabra *teoría* en una forma distinta a la de la conversación cotidiana. En ésta una teoría no es distinta de una hipótesis: una suposición que no se ha comprobado. Por otro lado, una teoría científica es una síntesis de un conjunto grande de información que abarca hipótesis bien comprobadas y verificadas acerca de ciertos aspectos del mundo natural. Por ejemplo, los físicos hablan de la teoría de *quarks* en los núcleos atómicos; los químicos hablan de la teoría del enlace metálico; y los biólogos hablan de la teoría celular.

Las teorías de la ciencia no son fijas, sino que van cambiando. Las teorías científicas evolucionan al pasar por estados de redefinición y refinamiento. Por ejemplo, durante los últimos 100 años la teoría del átomo se ha refinado varias veces, a medida que se reúnen más evidencias del comportamiento atómico. Asimismo, los químicos refinaron su idea de la forma en que se enlazan las moléculas, y los biólogos hicieron lo propio con la teoría celular. Más que una debilidad, el refinamiento de las teorías es un punto fuerte de la ciencia. Mucha gente piensa que cambiar sus ideas es un signo de debilidad. Los científicos competentes deben ser expertos en cambiar sus ideas. Sin embargo, lo hacen sólo cuando se confrontan con evidencia experimental firme, o cuando hay hipótesis conceptualmente más simples que los hacen adoptar un nuevo punto de vista. Más importante que defender las creencias es mejorarlas. Las mejores hipótesis las hacen quienes son honestos al confrontar la evidencia experimental.

Fuera de su profesión, los científicos no son, en forma inherente, más honestos o éticos que la mayoría de las personas. Sin embargo, en su profesión trabajan en un ambiente que recompensa generosamente la honestidad. La regla cardinal en la ciencia es que todas las hipótesis se deben probar; deben ser susceptibles, al menos en principio, a demostrar que están equivocadas. En la ciencia que haya un medio de demostrar que una idea está equivocada es más importante que haya uno de demostrar que es correcta. Se trata de un factor principal que distingue la ciencia de lo que no lo es. A primera vista parecería extraño, porque cuando nos asombramos con la mayoría de las cosas, nos preocupamos por encontrar las formas de averiguar si son ciertas. Las hipótesis científicas son distintas. De hecho, si quieres distinguir si una hipótesis es científica o no, trata de ver si hay una prue-

Los hechos son datos acerca del mundo que se pueden revisar.

Las teorías interpretan los hechos.



⁵ Pero recurrir a la *belleza* sí tiene valor en la ciencia, en tiempos modernos más de un resultado experimental ha contradicho una agradable teoría que con más investigaciones resultó equivocada. Esto ha impulsado la fe de los científicos en que la descripción de la naturaleza, correcta en última instancia, implica la concisión de expresión y la economía de los conceptos, y que esta combinación merece ser bella.

⁶ En tu educación no es suficiente percartarte de que otras personas te tratarán de engañar: es más importante darte cuenta de tu propia tendencia a engañarte.

ba para demostrar que es incorrecta. Si no hay prueba alguna de equivocación posible, entonces la hipótesis no es científica. Albert Einstein concretó esto al decir: "Con ningún número de experimentos se puede demostrar que estoy en lo cierto; un solo experimento puede demostrar que estoy equivocado."

Por ejemplo, la hipótesis del biólogo Darwin de que las formas de vida evolucionan de estados más simples a más complejos se podría demostrar que está equivocada, si los paleontólogos hubieran encontrado que formas más complejas de vida aparecieron antes que sus contrapartes más simples. Einstein supuso que la gravedad flexiona la luz, lo cual podría demostrarse que no es cierto, si la luz de una estrella rozara al Sol y pudiera verse que durante un eclipse solar no se desvía de su trayectoria normal. Sucede que se ha determinado que las formas menos complejas de vida anteceden a sus contrapartes más complejas, y que la luz de una estrella se flexiona al pasar cerca del Sol, todo lo cual respalda las afirmaciones. Así cuando se confirma una hipótesis o una afirmación científica, se considera útil como un escalón más para adquirir conocimientos adicionales.

Examinemos esta hipótesis: "La alineación de los planetas en el firmamento determina el mejor momento para tomar decisiones." Mucha gente la cree, pero no es científica. No se puede demostrar que está equivocada ni que es correcta. Es una *especulación*. De igual manera, la hipótesis "Existe vida inteligente en otros planetas en algún lugar del universo" no es científica. Aunque se pueda demostrar que es correcta por la verificación de un solo caso de vida inteligente que exista en algún lugar del Universo, no hay manera de demostrar que está equivocada, si es que no se encontrara nunca esa vida. Si buscáramos en los confines del Universo durante millones de años y no encontráramos vida, no demostraríamos que no existe a la vuelta de la esquina". Una hipótesis que es capaz de ser demostrada como correcta, pero que no se pueda demostrar que es incorrecta, no es

EXAMÍNATE

¿Cuáles de las siguientes hipótesis son científicas?

- a) Los átomos son las partículas más pequeñas de materia que existen.
- b) El espacio está permeado con una esencia que no se puede detectar.
- c) Albert Einstein fue el físico más grande del siglo xx.

COMPRUEBA TU RESPUESTA

Sólo la a) es científica, ya que hay una prueba para demostrar su falsedad. La afirmación no sólo es *susceptible* de demostrarse que está equivocada, sino que *de hecho* se ha demostrado que está equivocada. La afirmación b) no cuenta con una prueba de su posible falsedad y, por ello, no es científica. Sucede igual con cada principio o concepto para el que no hay métodos, procedimiento o prueba mediante los cuales se pueda demostrar que es incorrecto (si es que lo es). Algunos pseudocientíficos y otros aspirantes al conocimiento ni siquiera reparan en alguna prueba de la posible falsedad de sus afirmaciones. La afirmación c) es una aseveración para la cual no hay pruebas para demostrar su posible falsedad. Si Einstein no fuera el físico más grande, ¿cómo lo sabríamos? Es importante destacar que debido a que, en general, se tiene en gran estima a Einstein, es un favorito de los pseudocientíficos. Entonces, no nos debe sorprender que el nombre de Einstein, como el de Jesús o de algún otro hombre muy venerado sea citado con frecuencia por charlatanes que desean adquirir respeto para sí mismos y para sus puntos de vista. En todos los campos es prudente ser escéptico respecto a quienes desean crédito para ellos, citando la autoridad de otros.

científica. Hay muchas afirmaciones de esta clase que son muy razonables y útiles; pero quedan fuera del dominio de la ciencia.

Nadie de nosotros tiene el tiempo, la energía ni los recursos necesarios para demostrar todas las ideas, de manera que la mayoría de las veces aceptamos la palabra de alguien más. ¿Cómo sabemos qué palabras habría que aceptar? Para reducir la probabilidad de error, los científicos sólo aceptan la palabra de aquellos cuyas ideas, teorías y descubrimientos se pueden probar, si no en la práctica al menos en principio. Las especulaciones que no se pueden demostrar se consideran “no científicas”. Lo anterior tiene el efecto a largo plazo de fomentar la honestidad, porque los hallazgos muy publicados entre los científicos conocidos en general se someten a más pruebas. Tarde o temprano se encuentran las fallas (y la decepción) y quedan al descubierto las ilusiones. Un científico desacreditado ya no tiene otra oportunidad entre la comunidad de colegas. La sanción por el fraude es la excomunión profesional. La honestidad, tan importante para el progreso de la ciencia, se vuelve así materia de interés propio de los científicos. Hay relativamente poca oportunidad de tratar de engañar en un juego en el que se apuesta todo. En los campos de estudio donde no se establecen con tanta facilidad lo correcto y lo equivocado, es mucho menor la presión para ser honesto.

Con frecuencia, las ideas y los conceptos más importantes en nuestra vida cotidiana no son científicos; no se puede demostrar su veracidad o su falsedad en el laboratorio. Es muy interesante el que parece que las personas creen, honestamente, que sus propias ideas acerca de las cosas son correctas, y casi todos conocen a individuos que sostienen puntos de vista totalmente contrarios, por lo que las ideas de algunos (o de todos) deben ser incorrectas. ¿Cómo sabes que *tú* no eres de quienes sostienen creencias erróneas? Hay una forma de probarlo. Antes de que puedas convencerte en forma razonable de que estás en lo correcto acerca de una idea determinada, deberías estar seguro de comprender las objeciones y las posiciones que debes presentar a tus antagonistas. Debes averiguar si tus puntos de vista están respaldados por conocimientos firmes de las ideas contrarias, o por tus ideas *erróneas* de las ideas contrarias. Puedes hacer esta distinción viendo si puedes o no enunciar las objeciones y posiciones de tus oponentes *a su* entera satisfacción. Aun cuando puedas hacerlo con éxito, no estarías absolutamente seguro de que tus propias ideas sean las correctas, pero la probabilidad de que estés en lo correcto es bastante mayor si pasas esta prueba.



Cada uno de nosotros necesita un filtro del conocimiento para saber la diferencia entre lo que es válido y lo que tan sólo pretende ser válido. El mejor filtro del conocimiento que ha existido es la ciencia.

¡EUREKA!

EXAMÍNA TE

Supón que dos personas, A y B, no se ponen de acuerdo, y que notas que la persona A sólo describe y vuelve a describir un punto de vista, mientras que la persona B describe con claridad su propio punto de vista y también el de la persona A. ¿Quién es más probable que esté en lo correcto? (*¡Piensa bien antes de leer la respuesta de abajo!*)

COMPRUEBA TU RESPUESTA

¿Quién puede estar seguro? La persona B puede tener la astucia de un abogado que es capaz de enunciar diversos puntos de vista, y seguir estando equivocado. No podemos estar seguros “del otro”. La prueba de verdad o falsedad que sugerimos aquí no es una prueba de otros, sino una de ti. Te ayudará en tu desarrollo personal. Cuando trates de articular las ideas de tus antagonistas prepárate, como los científicos que se preparan para cambiar sus creencias, a descubrir evidencia contraria a tus propias ideas, pruebas que incluso cambien tus ideas. A menudo el crecimiento intelectual ocurre de esta manera.

PSEUDOCIENCIA

En los tiempos precientíficos, cualquier intento por aprovechar la naturaleza significaba forzarla contra su voluntad. Había que subyugarla, casi siempre con alguna forma de magia o con medios superiores a ella, es decir, sobrenaturales. La ciencia hace exactamente lo contrario y funciona dentro de las leyes naturales. Los métodos científicos han desplazado la confianza en lo sobrenatural, aunque no por completo. Persisten las viejas tradiciones, con toda su fuerza en las culturas primitivas, y sobreviven también en culturas tecnológicamente avanzadas a veces disfrazadas de ciencia. Esta ciencia falsa es la **pseudociencia**. El rasgo distintivo de una pseudociencia es que carece de los ingredientes clave de la evidencia y de contar con una prueba para las equivocaciones. En los ámbitos de la pseudociencia se restringen o se ignoran por completo el escepticismo y las pruebas de posibles equivocaciones.

Hay varias formas de considerar las relaciones de causa y efecto en el universo. Una de ellas es el misticismo, que quizá sea adecuado en la religión pero que no se aplica a la ciencia. La astrología es un antiguo sistema de creencias que sostiene que hay una correspondencia mística entre los individuos y la totalidad del universo, es decir, que todos los asuntos humanos están influidos por las posiciones y los movimientos de los planetas y de otros cuerpos celestes. Esta postura no científica llega a ser bastante agradable. No importa lo insignificantes que nos sintamos a veces, los astrólogos nos aseguran que estamos íntimamente relacionados con el funcionamiento del cosmos, que fue creado para los seres humanos, en particular para quienes pertenecen a la tribu, comunidad o grupo religioso de uno. La astrología como magia antigua es una cuestión y la astrología disfrazada de ciencia es otra. Cuando se considera como una ciencia relacionada con la astronomía, entonces se transforma en pseudociencia. Algunos astrólogos presentan sus actividades con un antifaz científico. Cuando usan información astronómica actualizada y computadoras que muestran gráficamente los movimientos de los cuerpos celestes, los astrólogos están operando dentro del ámbito de la ciencia. Pero cuando usan esos datos para cocinar revelaciones astrológicas, quiere decir que ya se desplazaron hacia el reino de la pseudociencia declarada.

La pseudociencia, como la ciencia, realiza predicciones. Las predicciones que hace un varólogo, o radiestesista, para localizar agua subterránea con una vara tienen éxito con frecuencia, casi del 100%. Siempre que el individuo despliega su ritual y señala un lugar del suelo, quien perfora pozos estará seguro de encontrar agua. La radiestesia funciona. Claro que el varólogo rara vez se equivoca, pues bajo casi todos los puntos en la Tierra hay agua freática a menos de 100 metros de la superficie. (¡La verdadera prueba para un radiestesista sería encontrar un lugar donde no hubiera agua!)

Un chamán que estudia las oscilaciones de un péndulo colgado sobre el abdomen de una mujer embarazada es capaz de predecir el sexo del feto con una exactitud del 50%, lo cual significa que si ensaya su magia varias veces con muchos fetos, la mitad de las predicciones serán correctas, y la otra mitad incorrectas; es la certeza de la

adivinación ordinaria. En cambio, la determinación del sexo de los fetos usando métodos científicos tiene una frecuencia de éxitos de 95%, con los sonogramas, y de 100% con la amniocentesis. Lo mejor que se puede decir de un chamán es que el 50% de éxitos es bastante mejor que el de los astrólogos, los lectores de la palma de la mano y de otros pseudocientíficos que predicen el futuro.

Un ejemplo de la pseudociencia que tiene nulo éxito es el de las máquinas multiplicadoras de energía, de las cuales se dice que generan más energía de la que consumen, y que "están todavía en los planos y necesitan fondos para desarrollarse". Son las que promueven los charlatanes que venden acciones a un público ignorante que sucumbe ante las magníficas promesas de éxito. Esto es ciencia chatarra. Los pseudocientíficos están en todos lados y, por lo general, tienen éxito para reclutar aprendices para tener dinero o mano de obra, y parecen convencer mucho incluso a gente aparentemente razonable. Sus libros son mucho más numerosos que los que hay de ciencia en las librerías. La ciencia chatarra prospera.

Hace cuatro siglos, en sus cortas y difíciles vidas los seres humanos estaban dominados por la superstición, los demonios, la enfermedad y la magia. Sólo gracias a un enorme esfuerzo se adquirieron conocimientos científicos y desecharon las supersticiones. Hemos avanzado mucho en la comprensión de la naturaleza y en nuestra liberación de la ignorancia. Debíamos regocijarnos de lo que hemos aprendido. Ya no tenemos que morir cuando nos ataca una enfermedad infecciosa. Ya no vivimos con el miedo a los demonios. Ya no nos atemoriza la tortura de las autoridades eclesiásticas. En la época medieval la vida era cruel. En la actualidad no necesitamos creer en la superstición ni en las nociones chatarra, ya sea que procedan de chamanes, charlatanes en una esquina, pensadores descarriados que escriben libros de la salud llenos de promesas, o por demagogos que infundan temor.

No obstante, hay razón para temer que las supersticiones de las que alguna vez se liberaron las personas regresen con fuerza sorprendente. James Randi dice en su libro *FlimFlam!* que en Estados Unidos hay más de 20,000 practicantes de la astrología que dan servicio a millones de ingenuos creyentes. Martin Gardner, escritor científico, indica que actualmente es mayor el porcentaje de estadounidenses que creen en la astrología y en los fenómenos ocultos que el de los habitantes de la Europa medieval. Sólo algunos periódicos publican una columna diaria sobre temas científicos, pero casi todos muestran los horóscopos del día. Aunque los bienes y los servicios se han mejorado gracias a los avances científicos, muchos individuos creen que no es así.

Muchos creen que la condición humana es resbalar y retroceder a causa de la creciente tecnología. Sin embargo, es más probable que retrocedamos porque la ciencia y la tecnología se rindan ante la irracionalidad, las supersticiones y la demagogia del pasado. Cuídate de los charlatanes. La pseudociencia es un negocio gigantesco y lucrativo.

Aunque la noción de estar familiarizado con puntos de vista opuestos parece inteligente a la mayoría de las personas con razonamiento, la mayoría practica exactamente lo contrario: protegernos a nosotros y a los demás contra las ideas contrarias. Se nos ha enseñado a despreciar las ideas no difundidas sin comprenderlas en el contexto adecuado. Con una visión perfecta de 20/20 retrospectiva, podemos ver que muchas de las “grandes verdades” —que fueron la piedra angular de civilizaciones enteras— no eran más que reflexiones superficiales de la ignorancia prevaleciente en la época. Muchos de los problemas que padeció la sociedad se originaron en esta ignorancia y en las ideas equivocadas que resultaban; mucho de lo que se sostenía como verdadero simplemente no lo era. Esto no se confina al pasado. Todo adelanto científico está, por necesidad, incompleto y en parte es inexacto, porque el descubridor observa a través de las persianas del momento, y sólo es capaz de evitar una parte de su bloqueo.

Ciencia, arte y religión

La búsqueda de orden y sentido en el mundo que nos rodea ha tomado diversas formas: una de ellas es la ciencia, otra es el arte y otra es la religión. Aunque las raíces de las tres se remontan a miles de años, las tradiciones de la ciencia son relativamente recientes. Lo más importante es que los ámbitos de la ciencia, el arte y la religión son distintos, aunque con frecuencia se traslapan. La ciencia se ocupa principalmente de descubrir y registrar los fenómenos naturales; en tanto que las artes se ocupan de la interpretación personal y la expresión creativa; y la religión busca la fuente, el objetivo y el significado de todo lo anterior.

La ciencia y las artes son comparables. En literatura encontramos lo que es posible en la experiencia humana. A través de ella aprendemos acerca de las emociones que van de la angustia al amor, aunque no las hayamos experimentado. Las artes no nos dan necesariamente esas experiencias, pero nos las describen y sugieren lo que puede estar reservado para nosotros. Un conocimiento de la ciencia, de igual manera, nos dice lo que es posible en la naturaleza. El conocimiento científico nos ayuda a pronosticar posibilidades en la naturaleza, aun antes de que se hayan experimentado esas posibilidades. Nos da una forma de relacionar cosas, de ver relaciones entre ellas, y de encontrar el sentido a la infinidad de eventos naturales que nos rodean. La ciencia amplía nuestra perspectiva del ambiente natural que nos rodea. Un conocimiento de las artes y las ciencias forma una totalidad que afecta la manera en que apreciamos el mundo y las decisiones que tomamos acerca de él y de nosotros. Una persona realmente educada tiene conocimientos tanto de artes como de ciencias.

También la ciencia y la religión tienen semejanzas, pero son básicamente distintas: sobre todo porque sus ámbitos son diferentes: el de la ciencia es el orden natural, y el de la religión es el propósito de la naturaleza. Las creencias y las prácticas religiosas, por lo general, implican la fe y la adoración de un ser supremo, así como la adhesión a una comunidad humana. Entonces, la ciencia y la religión son tan distintas como las manzanas y las naranjas: son dos campos distintos, aunque complementarios, de la actividad humana.

Cuando más adelante estudiemos la naturaleza de la luz, consideraremos la luz primero como una onda y después como una partícula. Para quien conoce algo acerca de la ciencia, las ondas y las partículas son contradictorias: la luz sólo puede ser una u otra, y debemos escoger entre ambas. Pero para quien tiene la mente abierta, las ondas y las partículas se complementan entre sí y ofrecen un entendimiento más



El arte tiene que ver con la belleza cósmica; la ciencia, con el orden cósmico; y la religión, con el propósito cósmico.

¡EUREKA!



Me parece que la creencia de que sólo hay una verdad y que uno mismo la posee es la raíz más profunda de todo el mal que existe en el mundo.

Max Born

¡EUREKA!

profundo sobre la luz. De forma parecida, son básicamente las personas que están mal informadas acerca de las naturalezas profundas tanto de la ciencia y de la religión quienes sienten que deben elegir entre creer en la religión o creer en la ciencia. A menos que uno tenga un conocimiento superficial de una de ellas o de ambas, no hay contradicción en ser religioso y ser científico en el razonamiento.⁷

Muchas personas se inquietan cuando no conocen las respuestas a preguntas religiosas y filosóficas. Algunas evitan la incertidumbre aceptando sin criticar casi cualquier respuesta que parezca cómoda. Sin embargo, un mensaje importante en la ciencia es que se puede aceptar la incertidumbre. Por ejemplo, en el capítulo 31 aprenderás que no es posible conocer al mismo tiempo, con certidumbre, la cantidad de movimiento y la posición de un electrón en un átomo. Cuanto más conoces una de ellas, menos conoces la otra. La incertidumbre es una parte del proceso científico. Está bien no conocer las respuestas a preguntas fundamentales. ¿Por qué las manzanas son atraídas gravitacionalmente hacia la Tierra? ¿Por qué los electrones se repelen entre sí? ¿Por qué los imanes interactúan con otros imanes? ¿Por qué la energía tiene masa? En el nivel más profundo los científicos no conocen las respuestas a estas preguntas; al menos todavía no. En general, los científicos se sienten cómodos al no saber. Conocemos mucho acerca de dónde estamos, pero en realidad nada acerca de *por qué* estamos ahí. Es admisible no conocer las respuestas a estas cuestiones religiosas, en especial si mantenemos un pensamiento y un corazón abiertos con los cuales sigamos explorando.

Ciencia y tecnología

También la ciencia y la tecnología son distintas entre sí. La ciencia se ocupa de reunir conocimientos y de organizarlos. La tecnología permite al hombre usar esos conocimientos para fines prácticos, y brinda las herramientas que necesitan los científicos en sus investigaciones.

No obstante, la tecnología es una espada de dos filos, que puede resultar útil o nociva. Por ejemplo, contamos con la tecnología para extraer combustibles fósiles del suelo, para después quemarlos y generar energía. La producción de energía a través de combustibles fósiles ha beneficiado a nuestra sociedad de incontables maneras. Por otro lado, la quema de combustibles fósiles pone en riesgo el ambiente. Resulta tentador echar la culpa a la tecnología misma por problemas como la contaminación, el agotamiento de los recursos y hasta por la explosión demográfica. Sin embargo, estos problemas no son culpa de la tecnología, así como una herida de bala no es culpa del arma de fuego. Los seres humanos usamos la tecnología y somos los responsables de la manera en que se utiliza.

Es notable que ya poseamos la tecnología para resolver muchos problemas del medio ambiente. Es probable que el siglo XXI vea un cambio de combustibles fósiles a fuentes de energía más sustentables, como la fotovoltaica, heliotérmica o la conversión de la biomasa. Si bien el papel usado en este libro proviene de los árboles, pronto se obtendrá de la maleza de rápido crecimiento, y se necesitará menos de él cuando se popularicen las pantallas pequeñas y de fácil lectura. Cada vez reciclamos más los productos de desecho. En algunas partes del mundo se avanza en el control de la explosión demográfica que agrava casi todos los problemas con que

⁷ Claro que esto no se aplica a ciertos fundamentalistas, quienes tenazmente aseguran que uno no puede adoptar su religión y creer en la ciencia al mismo tiempo.

EVALUACIÓN DE RIESGOS

Las numerosas ventajas de la tecnología van aparejadas con los riesgos. Cuando se observa que las ventajas de una innovación tecnológica superan los riesgos, la tecnología se acepta y aplica. Por ejemplo, los rayos X se continúan usando en el diagnóstico médico, a pesar de su potencial para originar cáncer. Pero cuando se percibe que los riesgos de una tecnología superan sus ventajas, raras veces se debería usar o quizá nunca.

El riesgo varía según distintos grupos. La aspirina es útil para los adultos, pero en los niños pequeños llega a causar un estado potencialmente letal, llamado *síndrome de Reye*. Arrojar aguas residuales a un río de la localidad originaría riesgos menores para una población asentada aguas arriba, pero sería un riesgo mayor para la salud de quienes residen aguas abajo de esa descarga. Asimismo, almacenar residuos radiactivos en depósitos subterráneos ocasionará poco riesgo para nosotros actualmente; sin embargo, tales riesgos serán mayores para las futuras generaciones, si hubiera fugas hacia las aguas subterráneas. Las tecnologías que impliquen diversos riesgos para personas distintas, al igual que distintas ventajas, dan lugar a dudas que con frecuencia se debaten acaloradamente. ¿Qué medicamentos deben venderse al público general sin receta y cómo se deben identificar? ¿Se deben irradiar los alimentos para que terminen las intoxicaciones que matan a más de 5,000 estadounidenses cada año? Se deben tener en cuenta los riesgos de todos los miembros de la sociedad, cuando se deciden las políticas públicas.

No siempre los riesgos de la tecnología son evidentes al inicio. Nadie se dio cuenta de lo peligroso de los productos de la combustión cuando se optó por el petróleo como combustible en los automóviles de principios del siglo xx. Con una visión retrospectiva de 20/20, hubieran sido mejores los alcoholes obtenidos de la biomasa, desde el punto de vista del medio ambiente; pero fueron prohibidos por las

corrientes prohibicionistas de esos días. Al tener más en cuenta los costos ambientales de la combustión de materias fósiles, los combustibles de biomasa están regresando lentamente. Resulta fundamental tener en cuenta los riesgos de una tecnología, tanto a corto como a largo plazos.

Parece que los individuos aceptan con dificultad la imposibilidad de que haya cero riesgos. No es posible hacer que los aviones sean perfectamente seguros. Los alimentos procesados no se pueden elaborar totalmente libres de toxicidad, porque todos los alimentos son tóxicos hasta cierto grado. Tú no puedes ir a la playa sin arriesgarte a padecer un cáncer de la piel, sin importar cuántos filtros solares uses. No puedes evitar la radiactividad, porque está en el aire que respiras y en los alimentos que ingieres, y siempre ha sido así incluso antes de que los seres humanos comenzaran a caminar sobre la Tierra. Hasta la lluvia más prístina contiene carbono 14 radiactivo, sin mencionar el de nuestros propios organismos. Entre cada latido del corazón humano siempre ha habido unas 10,000 desintegraciones radiactivas naturales. Podrías esconderte en las montañas, comer los alimentos más naturales, practicar una higiene obsesiva y aun así morir del cáncer causado por la radiactividad que emana de tu propio cuerpo. La probabilidad de una muerte final es 100%. Nadie está exento.

La ciencia ayuda a determinar qué es lo más probable. A medida que mejoran las herramientas de la ciencia, la evaluación de lo más probable se acerca más al objetivo. Por otro lado, la aceptación del riesgo es un asunto social. Establecer cero riesgo como meta social no sólo es impráctico, sino egoísta. Toda sociedad que trate de tener una política de cero riesgo consumiría sus recursos económicos actuales y futuros. ¿No es más noble aceptar riesgos distintos de cero, y minimizarlos todo lo posible dentro de los límites de lo posible? Una sociedad que no acepta riesgos no recibe beneficios.

se enfrentan hoy los seres humanos. El máximo obstáculo para resolver los problemas actuales se debe más a la inercia social que a la carencia de tecnología. La tecnología es nuestra herramienta. Lo que hagamos con ella depende de nosotros mismos. La promesa de la tecnología es un mundo más limpio y más saludable. Las aplicaciones adecuadas de la tecnología *pueden* guiarnos hacia un mundo mejor.

Física: la ciencia básica

La ciencia alguna vez se llamó *filosofía natural*, y abarca el estudio de las cosas vivientes y no vivientes: las ciencias de la vida y las ciencias físicas. Entre las ciencias de la vida están la biología, la zoología y la botánica. Entre las ciencias físicas están la geología, la astronomía, la química y la física.

La física es más que una parte de las ciencias físicas. Es la ciencia *básica*. Es acerca de la naturaleza de cosas básicas como el movimiento, las fuerzas, la energía, la materia, el calor, el sonido, la luz y la estructura de los átomos. La química

explica cómo se acomoda la materia entre sí, cómo se combinan los átomos para formar moléculas, y cómo éstas se combinan para formar los materiales que nos rodean. La biología es más compleja y se ocupa de la materia que está viva. Por lo anterior, en la base de la biología está la química, y en la base de la química está la física. Los conceptos de la física llegan hasta dichas ciencias, que son algo más complicadas. Ésta es la razón por la que la física es la ciencia más fundamental.

La comprensión de la ciencia comienza con el entendimiento de la física. Los capítulos que siguen presentan la física en forma conceptual, de manera que puedas disfrutarla comprendiéndola.

EXAMÍNAME

¿En cuáles de las siguientes actividades interviene lo máximo de la expresión humana, de la pasión, el talento y la inteligencia?

- a) Pintura y escultura.
- b) Literatura.
- c) Música.
- d) Religión.
- e) Ciencia.

En perspectiva



La ciencia es la forma de conocer acerca del mundo y darle sentido.

¡EUREKA!

Sólo hasta hace algunos siglos, los artistas, arquitectos y artesanos más talentosos y más hábiles del mundo dirigían su genio y sus esfuerzos a la construcción de grandes catedrales, sinagogas, templos y mezquitas. Algunas de esas estructuras arquitectónicas tardaron siglos en construirse, lo cual significa que nadie atestiguó tanto su comienzo como su término. Hasta los arquitectos y los primeros constructores que vivieron hasta la madurez o hasta una edad avanzada nunca vieron el resultado ya terminado de su trabajo. Vidas enteras transcurrieron a la sombra de la construcción que debe haber parecido sin principio ni fin. Este enorme enfoque de la energía humana estaba inspirado por una visión que iba más allá de los afanes mundanos, una visión del cosmos. Para la gente de esos tiempos, las estructuras que erigieron fueron sus “naves espaciales de fe”, ancladas con firmeza, pero apuntando hacia el cosmos.

En la actualidad, los esfuerzos de muchos de nuestros científicos, ingenieros, artistas y artesanos más hábiles se dirigen a construir las naves espaciales que

COMPRUEBA TU RESPUESTA

¡En todas ellas! Sin embargo, el valor humano de la ciencia es el que menos entiende la mayoría de los individuos de nuestra sociedad. Las causas son diversas y van desde la noción común de que la ciencia es incomprensible para la gente común, hasta la idea extrema de que la ciencia es una fuerza deshumanizadora en nuestra sociedad. La mayoría de las ideas erróneas acerca de la ciencia surgen, probablemente, de la confusión entre los abusos de la ciencia y la ciencia misma.

La ciencia es una actividad humana fascinante que comparte una gran variedad de personas que, con las herramientas y los conocimientos actuales, avanzan e indagan más acerca de sí mismas y de su ambiente, que lo que podían hacer las personas en el pasado. Cuanto más conozcas acerca de la ciencia, más apasionado te sentirás hacia tus entornos. ¡En todo lo que ves, oyes, hueles, gustas y tocas hay física!

ya giran en órbita alrededor de la Tierra, y otras que viajarán más allá de ésta. El tiempo necesario para construir estas naves es breve en extremo, en comparación con el que tardaban en construirse las estructuras de piedra y mármol del pasado. Muchos individuos que trabajan en las naves espaciales actuales ya vivían antes de que el primer avión a reacción transportara pasajeros. ¿Hacia dónde se dirigirán las vidas más jóvenes cuando pase un tiempo similar?

Parece que estamos en los albores de un gran cambio en el crecimiento humano porque, como el pequeño Evan dice en la fotografía capitular, podemos ser como los pollitos que salen del cascarón, que han agotado los recursos del interior de su huevo y que están a punto de entrar a toda una nueva variedad de posibilidades. La Tierra es nuestra cuna y nos ha servido bien. Pero las cunas, no importa cuán confortables sean, algún día se vuelven estrechas. Así, con la inspiración que en muchas formas se parece a la inspiración de quienes construyeron las antiguas catedrales, las sinagogas, los templos y las mezquitas, apuntemos hacia el cosmos.

¡Vivimos tiempos emocionantes!

Resumen de términos

Hecho Fenómeno acerca del cual concuerdan observadores competentes, que han realizado una serie de observaciones.

Hipótesis Conjetura educada: una explicación razonable de una observación o resultado experimental que no se acepta totalmente como hecho, sino hasta que se prueba una y otra vez con experimentos.

Ley Hipótesis o afirmación general acerca de las relaciones de cantidades naturales, que se han probado una y otra vez, y que no se han contradicho. También se llama principio.

Pseudociencia Ciencia falsa que pretende ser ciencia verdadera.

Método científico Principios y procedimientos para la búsqueda sistemática de conocimiento, que incluye el reconocimiento y la formulación de un problema, la recopilación de datos a través de la observación y la experimentación, así como la formulación y la prueba de hipótesis.

Teoría Síntesis de un gran conjunto de información que abarca hipótesis bien probadas y verificadas acerca de los aspectos del mundo natural.

Lecturas sugeridas

Bodanis, David. *E = mc²: A Biography of the World's Most Famous Equation*. New York: Berkeley Publishing Group, 2002.

Bronowski, Jacob. *Science and Human Values*. New York: Harper & Row, 1965.

Bryson, Bill. *A Short History of Nearly Everything*. New York: Broadway Books, 2003.

Cole, K. C. *First You Build a Cloud*. New York: Morrow, 1999.

Feynman, Richard P. *Surely You're Joking, Mr. Feynman*. New York: Norton, 1986.

Gleick, James. *Genius—The life and Science of Richard Feynman*. New York: Pantheon Book, 1992.

Sagan, Carl. *The Demon-Haunted World*. New York: Random House, 1995.

Preguntas de repaso

1. En forma breve, ¿qué es la ciencia?
2. A través de las eras, ¿cuál ha sido la reacción general hacia las nuevas ideas acerca de las "verdades" establecidas?

Mediciones científicas

3. Cuando el Sol estaba directamente arriba de Siena, ¿por qué no estaba directamente arriba de Alejandría?
4. La Tierra, como todo lo que ilumina el Sol, proyecta una sombra. ¿Por qué esa sombra es cónica?
5. ¿Cómo se compara el diámetro de la Luna con la distancia de la Tierra a la Luna?
6. ¿Cómo se compara el diámetro del Sol con la distancia de la Tierra al Sol?
7. ¿Por qué Aristarco hizo sus mediciones de la distancia al Sol en el momento de la media Luna?
8. En un día soleado, ¿qué son las manchas circulares de luz que se ven en el piso bajo un árbol?

Matemáticas: el lenguaje de la ciencia

9. ¿Cuál es el papel de las ecuaciones en este curso?

El método científico

10. Describe los pasos del método científico clásico.

La actitud científica

11. Señala la diferencia entre hecho, hipótesis, ley y teoría científicos.
12. En la vida diaria con frecuencia, a la gente que mantiene determinado punto de vista se le alaba por el

"coraje de sus convicciones". Se considera que un cambio de actitud es un signo de debilidad. ¿Es así en la ciencia?

13. ¿Cuál es la prueba para determinar si una hipótesis es científica o no?
14. En la vida diaria se observan muchos casos de individuos a quienes se les descubre malinterpretando las cosas, y quienes después pronto son disculpados y aceptados por sus contemporáneos. ¿Es diferente en la ciencia?
15. ¿Qué prueba puedes hacer para aumentar las probabilidades de que tus propias ideas acerca de algo sean correctas?

Ciencia, arte y religión

16. ¿Por qué a los alumnos de artes se les recomienda estudiar ciencias, y a los estudiantes de ciencias se les recomienda estudiar artes?
17. ¿Por qué muchas personas creen que deben optar entre la ciencia y la religión?
18. La comodidad psicológica es una de las ventajas de tener respuestas firmes a preguntas religiosas. ¿Qué ventaja acompaña a una posición de no conocer las respuestas?

Ciencia y tecnología

19. Describe con claridad la diferencia entre ciencia y tecnología.

Física: la ciencia básica

20. ¿Por qué a la física se le considera la ciencia básica?

Proyectos

1. Haz un agujerito en un cartón, y sostenlo horizontalmente debajo de los rayos del Sol. Observa la imagen del Sol que se forma abajo. Para convencerte de que la mancha redonda de luz es una imagen del Sol redondo, prueba con agujeros de distintas formas. Un agujero cuadrado o uno triangular producirá una imagen redonda si la distancia a la imagen es grande en comparación con el tamaño del agujero. Cuando los rayos del sol y la superficie donde llegan son perpendiculares, la imagen es un círculo; cuando los rayos del Sol forman un ángulo con la superficie de la imagen, esa imagen es un "círculo estirado", es decir, una elipse. Deja que la imagen del Sol caiga en una moneda. Coloca el cartón de manera que la imagen apenas cubra la moneda. Es una forma conveniente de medir el diámetro de la imagen; es del mismo diámetro que el de la moneda, que se puede medir con facilidad. A continuación mide la distancia entre el cartón y la moneda. La relación del tamaño de la imagen entre la distancia a la imagen debe ser más o menos $1/110$. Es la relación del diámetro del Sol entre la distancia del Sol a la Tierra. Con el dato que el Sol está a 150,000,000 de kilómetros de la Tierra, calcula el diámetro del Sol.

2. De ésta o de la próxima semana elige un día específico y ese día lleva una libretita y, cada vez que estés en contacto con la tecnología moderna, anota la situación. Después de hacerlo, escribe un breve análisis de una o dos páginas acerca de tu dependencia hacia tu lista de tecnología. Explica cómo te afectaría si tal tecnología repentinamente desapareciera y cómo enfrentarías dicha pérdida.

Ejercicios

1. ¿Cuál es la sanción por un fraude en la ciencia dentro de la comunidad científica?
2. ¿Cuáles de las siguientes son hipótesis científicas?
a) La clorofila hace que el pasto sea verde. b) La Tierra gira en torno a su eje, porque los seres vivos necesitan una alternancia de luz y sombra. c) Las mareas son causadas por la Luna.
3. Para responder la pregunta "cuando crece una planta, ¿de dónde proviene su materia?". Aristóteles propuso, por lógica, que toda la materia proviene del suelo. ¿Consideras que esta hipótesis es correcta, incorrecta o parcialmente correcta? ¿Qué experimentos propones para respaldar tu opción?
4. Bertrand Russell (1872-1970), gran filósofo y matemático, escribió acerca de las ideas que tuvo en las primeras etapas de su vida, y que después rechazó. ¿Crees que éste es un signo de debilidad o de fortaleza en Bertrand Russell? (¿Crees que tus ideas actuales acerca del mundo que te rodea cambiarán cuando aprendas más y tengas más experiencia, o crees que los conocimientos y la experiencia adicionales robustecerán tus percepciones actuales?)
5. Bertrand Russell escribió: "Creo que deberíamos sostener la creencia de que el conocimiento científico es una de las glorias del hombre. No digo que el conocimiento nunca pueda hacer daño. Creo que esas proposiciones generales casi siempre pueden refutarse con ejemplos bien elegidos. Lo que sostengo, y sostendré con vigor, es que el conocimiento es útil con mucho más frecuencia que dañino, y que el miedo al conocimiento es dañino con mucho más frecuencia que útil." Imagina ejemplos que respalde esta afirmación.
6. Cuando sales de la sombra a la luz solar, el calor del Sol es tan evidente como el que procede del carbón caliente en un anafre que esté en una habitación fría. Sientes el calor del Sol no por su alta temperatura (hay mayores temperaturas en algunos sopletes para soldar), sino porque el Sol es grande. ¿Qué crees que sea mayor, el radio del Sol o la distancia de la Tierra a la Luna? Comprueba tu respuesta en los datos del interior de la contraportada. ¿Crees que es sorprendente tu respuesta?
7. La sombra que produce una columna vertical en Alejandría, a mediodía y durante el solsticio de verano, es $1/8$ de la altura de la columna. La distancia entre Alejandría y Siena es $1/8$ del radio de la Tierra. ¿Hay

alguna conexión geométrica entre estas dos relaciones iguales a $1/8$?

8. Si la Tierra fuera más pequeña de lo que es, ¿la sombra del pilar vertical de Alejandría sería más grande o más pequeña en un atardecer del solsticio de verano?

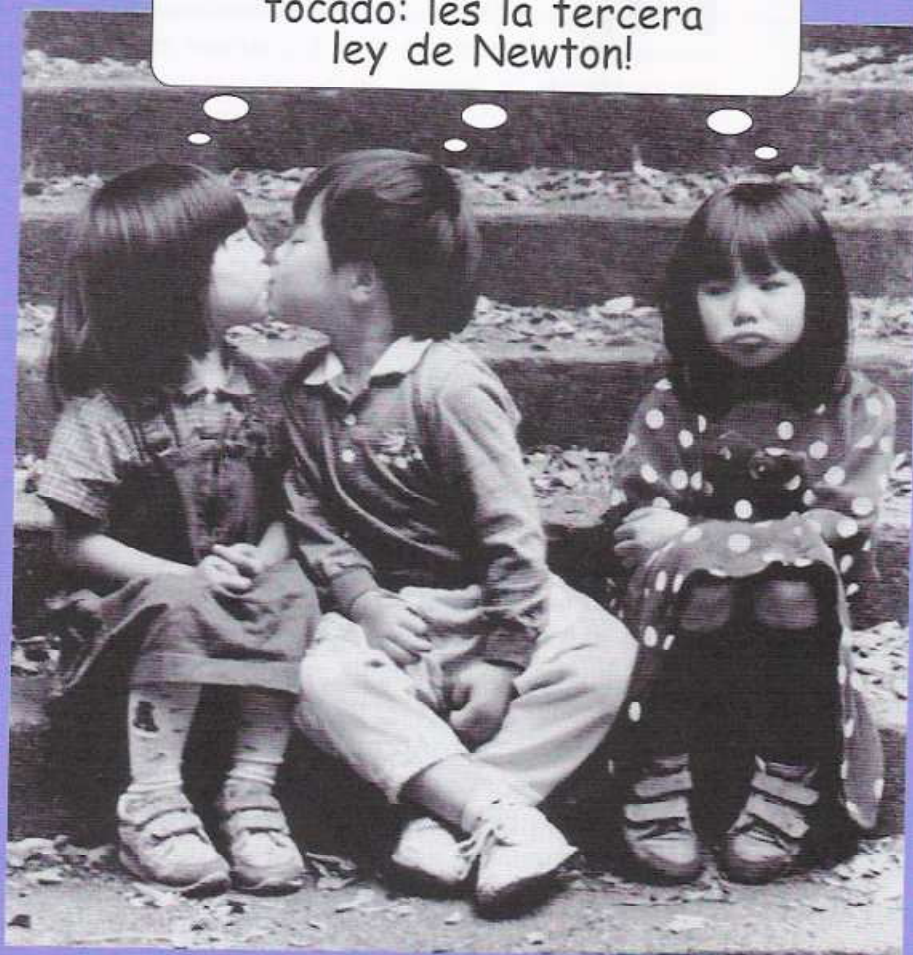
9. ¿Qué es probable que malentienda un individuo que afirma "eso es tan sólo una teoría científica"?

10. A una teoría que armoniza muchas ideas en una forma sencilla los científicos la llaman "bella". ¿La armonía y la sencillez están entre los criterios de belleza fuera de la ciencia? Justifica tu respuesta.

PARTE UNO

Mecánica

No puedes tocar sin ser
tocado: es la tercera
ley de Newton!



Primera ley de Newton del movimiento: inercia

Burl Grey, fue quien primero introdujo al autor en el concepto de la tensión. Aquí muestra que una bolsa de 2 lb produce una tensión de 9 N.

Hace más de 2000 años, los antiguos científicos griegos estaban familiarizados con algunas de las ideas de la física que estudiamos en la actualidad. Comprendían bien algunas de las propiedades de la luz, aunque estaban algo confundidos acerca del movimiento. Uno de los primeros en estudiar con seriedad el movimiento fue Aristóteles, el filósofo y científico más destacado de la Grecia antigua. Aristóteles intentó aclarar el movimiento clasificándolo.

El movimiento según Aristóteles

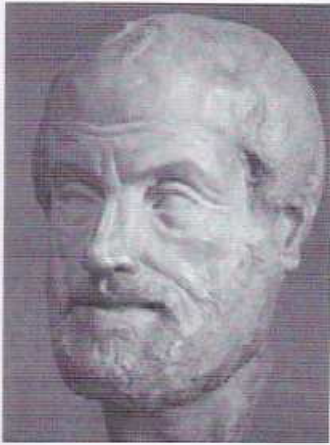
Aristóteles dividió el movimiento en dos clases principales: el movimiento natural y el movimiento violento. Veremos cada uno en forma breve, no como material de estudio, sino tan sólo como antecedente de las ideas actuales acerca del movimiento.

Aristóteles aseguraba que el movimiento natural surge a partir de la “naturaleza” de un objeto, dependiendo de qué combinación tenía de los cuatro elementos que formaban al objeto (tierra, agua, aire y fuego). Consideraba que todo objeto en el universo tiene un lugar propio determinado por esa “naturaleza”, y cualquier objeto que no está en su lugar propio “se esforzará” por alcanzarlo. Al estar en la Tierra, un terrón de arcilla no soportado cae al suelo; al estar en el aire, una bocanada de humo no restringida se eleva; como una mezcla de tierra y aire, pero principalmente de tierra, una pluma cae al suelo, pero no con tanta rapidez como un terrón de arcilla. Afirmaba que los objetos más pesados opondrían resistencia con más fuerza. Por consiguiente, decía, los objetos deben caer a rapideces proporcionales a sus pesos: cuanto más pesado sea un objeto, más rápido debería caer.

El movimiento natural podía ser directo hacia arriba o directo hacia abajo, como en el caso de todas las cosas sobre la Tierra; o podía ser circular, como en el caso de los objetos celestes. A diferencia del movimiento hacia arriba o hacia abajo, el movimiento circular no tiene principio ni fin, y se repite sin desviarse. Aristóteles creía que en los cielos rigen reglas distintas, y aseguró que los cuerpos celestes son esferas perfectas hechas de una sustancia perfecta e inmutable, a la cual llamó *quintaesencia*.¹ (El único objeto celeste con variación discernible en su superficie era la Luna. Los cristianos medievales, todavía bajo la influencia de

¹ La quintaesencia es la quinta esencia; las otras cuatro son tierra, agua, aire y fuego.

ARISTÓTELES (384 – 322 A. C.)



era sistematizar el conocimiento existente, así como Euclides había sistematizado la geometría. Hizo observaciones

Aristóteles, filósofo, científico y educador griego era hijo de un médico, quien estaba al servicio personal del rey de Macedonia. A los 17 años de edad ingresó a la Academia de Platón, donde trabajó y estudió durante 20 años, hasta la muerte de este último. Aristóteles fue tutor del joven Alejandro el Grande y, ocho años después, fundó su propia escuela. Su objetivo

críticas, reunió especímenes, y recopiló, resumió y clasificó, la mayoría del conocimiento del mundo físico de su tiempo. Su enfoque sistemático se convirtió en el método del cual surgiría más adelante la ciencia occidental. Después de su muerte, sus extensos cuadernos de notas se preservaron en cuevas cerca de su casa, y luego fueron vendidos a la biblioteca de Alejandría. La actividad científica cesó en la mayoría del Viejo Continente durante la Edad del Oscurantismo, de manera que los trabajos de Aristóteles se olvidaron o se perdieron entre los eruditos que continuaron en los imperios bizantino e islámico. Algunos textos fueron reintroducidos a Europa durante los siglos XI y XII, y se tradujeron al latín. En un inicio la Iglesia, la principal fuerza política y cultural en Europa Occidental, prohibió las obras de Aristóteles, pero después las aceptó y las incorporó en la doctrina cristiana.

las enseñanzas de Aristóteles. explicaban esto diciendo que debido a la proximidad de la Luna, está algo contaminada por la corrompida (Tierra.)

El movimiento violento, la otra clase de movimiento de Aristóteles, se debía a fuerzas de empuje o tracción. El movimiento violento es impuesto. Un individuo que empuja un carrito o levanta un peso impone movimiento, al igual que quien lanza una piedra o gana en una competencia de tirar de una cuerda. El viento impone movimiento a los navíos. Las inundaciones imponen movimiento a los pedruscos y a los troncos de los árboles. Lo esencial acerca del movimiento violento es que es causado externamente y se imparte a los objetos. No se mueven por sí mismos ni por su "naturaleza", sino gracias a empujes o tirones (tracciones).

El concepto del movimiento violento tiene sus dificultades, ya que los empujes o los tirones no siempre son evidentes. Por ejemplo, la cuerda de un arco mueve la flecha hasta que ésta sale del arco; después, para seguir explicando el movimiento de la flecha se requiere que haya otro agente de empuje. De manera que Aristóteles imaginaba que la brecha en el aire originada por el movimiento de la flecha causaba un efecto de apriete en la parte trasera de la flecha, a medida que el aire regresaba para evitar que se formara el vacío. La flecha se impulsaba por el aire como cuando una barra de jabón se impulsa en la tina de baño cuando se aprieta uno de sus lados.

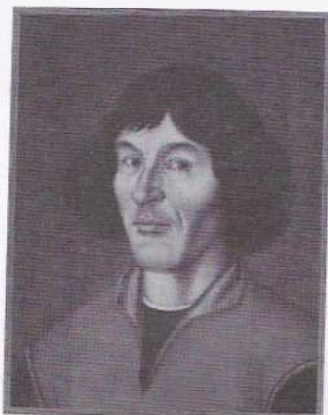
En resumen, Aristóteles enseñaba que todos los movimientos se debían a la naturaleza del objeto en movimiento, o a un empuje o tracción sostenidos. Siempre que un objeto está en su lugar propio no se moverá, a menos que se le someta a una fuerza. A excepción de los objetos celestes, el estado normal es el de reposo.

Las afirmaciones de Aristóteles acerca del movimiento fueron el comienzo del pensamiento científico, y aunque él no creía que fueran definitivas acerca del tema, durante casi 2,000 años sus seguidores consideraron sus ideas como fuera de toda duda. La noción de que el estado normal de los objetos es el de reposo estaba implícita en el pensamiento antiguo, el medieval y el de principios del Renacimiento. Como era evidente para la mayoría de los pensadores hasta el siglo XVI que la Tierra debe estar en su lugar propio, y como es inconcebible que haya una fuerza capaz de moverla, resultaba bastante claro que la Tierra no se movía.

EXAMÍNAME

¿No es sentido común imaginar que la Tierra está en su lugar propio y que es inconcebible que haya una fuerza que la mueva, como afirmaba Aristóteles, y que la Tierra está en reposo en este Universo?

Copérnico y la Tierra en movimiento



Nicolás Copérnico
(1473-1543)

En este ambiente intelectual Nicolás Copérnico (1473-1543), astrónomo polaco, formuló su teoría sobre el movimiento de la Tierra. Dedujo que la forma más sencilla de explicar los movimientos observados del Sol, la Luna y los planetas por el cielo es suponiendo que la Tierra y otros planetas describen círculos alrededor del Sol. Durante años desarrolló sus ideas sin hacerlas públicas, por dos razones fundamentales. La primera fue que tenía miedo de ser perseguido; una teoría tan distinta de la opinión común con seguridad se tomaría como un ataque al orden establecido. La segunda razón fue que él mismo tenía serias dudas, porque no podía reconciliar la idea de una Tierra en movimiento con las ideas que prevalecían acerca del movimiento. Finalmente, en los últimos días de su vida, y por la insistencia de sus amigos más íntimos, mandó a la imprenta su *De Revolutionibus*. El primer ejemplar de su famosa exposición llegó a él el día de su muerte: el 24 de mayo de 1543.

La mayoría de nosotros conoce la reacción de la Iglesia medieval contra la idea de que la Tierra viaja alrededor del Sol. Como las ideas de Aristóteles se habían integrado de manera tan formidable a la doctrina de la Iglesia, contradecirlas era cuestionar a la Iglesia misma. Para muchos dignatarios del clero la idea de una Tierra en movimiento no sólo amenazaba su autoridad, sino también las bases mismas de la fe y de la civilización. Para bien o para mal, esta nueva idea iba a derrumbar su concepción del Cosmos, aunque a final de cuentas la Iglesia la adoptó.

Galileo y la Torre Inclinada

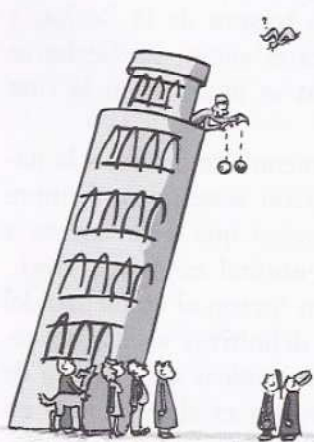


FIGURA 2.1
La famosa demostración
de Galileo.

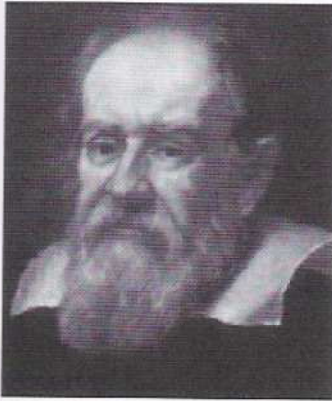
Fue Galileo, el principal científico de principios del siglo XVII, quien dio crédito a la idea de Copérnico de una Tierra en movimiento. Lo logró desacreditando las ideas aristotélicas sobre el movimiento. Aunque no fue el primero en señalar los problemas en las ideas de Aristóteles, sí fue el primero en ofrecer refutación contundente mediante la observación y el experimento.

Galileo demolió con facilidad la hipótesis de Aristóteles acerca de la caída de los cuerpos. Se dice que Galileo dejó caer objetos de varios pesos desde lo más alto de la Torre Inclinada de Pisa, y luego comparó las caídas. Al contra-

COMPRUEBA TU RESPUESTA

Las ideas de Aristóteles eran lógicas y consistentes con las observaciones cotidianas. Entonces, a menos que te familiarices con la física que presentamos en este libro, las ideas de Aristóteles acerca del movimiento sí tienen sentido común. Sin embargo, a medida de que adquieras más información acerca de las reglas de la naturaleza, es probable que progrese tu sentido común más allá del pensamiento aristotélico.

GALILEO GALILEI (1564 – 1642)



Galileo nació en Pisa, Italia, el mismo año que nació Shakespeare y que murió Miguel Ángel. Estudió medicina en la Universidad de Pisa, pero después se dedicó a las matemáticas. Mostró un interés temprano en el movimiento, y pronto tuvo desacuerdos con sus contemporáneos, quienes se apegaban a las ideas

aristotélicas sobre la caída de los cuerpos. Dejó Pisa para enseñar en la Universidad de Padua y se volvió partidario de la nueva teoría copernicana sobre el sistema solar. Fue uno de los primeros en construir un telescopio, y el primero en dirigirlo hacia el cielo nocturno, y en descubrir monta-

ñas en la Luna y las lunas de Júpiter. Como publicó sus hallazgos en italiano, y no en latín como era de esperarse de un sabio tan afamado, y debido a la reciente invención de la imprenta, sus ideas estuvieron muy difundidas. Pronto enfrentó dificultades con la Iglesia, y se le indicó que no enseñara ni respaldara las ideas de Copérnico. Se abstuvo de divulgar sus ideas durante 15 años, pero después publicó de manera desafiante sus observaciones y conclusiones, que eran contrarias a la doctrina de la Iglesia. El resultado fue un juicio donde se le encontró culpable, y fue obligado a renunciar a sus descubrimientos. Para entonces ya era anciano, con la salud y el espíritu quebrantados, fue sentenciado a un arresto domiciliario perpetuo. Sin embargo, terminó sus estudios sobre el movimiento, y sus escritos salieron clandestinamente de Italia y se publicaron en Holanda. Ya antes se había dañado los ojos al observar el Sol a través de un telescopio, y a los 74 años de edad quedó ciego. Murió cuatro años después.

rio de la aseveración de Aristóteles, Galileo encontró que una piedra con el doble de peso que otra no caía con el doble de rapidez. A excepción del pequeño efecto de la resistencia del aire, encontró que los objetos de distinto peso, cuando se sueltan al mismo tiempo, caían juntos y llegaban al suelo en el mismo momento. Se dice que en una ocasión Galileo reunió a un gran número de personas para que atestiguaran la caída de dos objetos de distinto peso que lanzaría desde lo alto de la torre. Dice la leyenda que muchos de quienes observaron que los objetos llegaban al suelo al mismo tiempo, se mofaron del joven Galileo y continuaron apegándose a las enseñanzas aristotélicas.

Los planos inclinados de Galileo



Galileo estaba más preocupado en *cómo* se mueven los objetos que en el *porqué* se mueven. Demostró que el experimento, más que la lógica, es la mejor prueba del conocimiento.

¡EUREKA!

Aristóteles era un observador astuto de la naturaleza, y estudió problemas de su entorno más que estudiar casos abstractos que no se presentaban en su ambiente. El movimiento siempre implicaba un medio de resistencia, como el aire o el agua. Creía que es imposible el vacío y, en consecuencia, no dio gran importancia al movimiento en ausencia de un medio en interacción. Era básico para Aristóteles que un objeto requiere de un empuje o un tirón para mantenerse en movimiento. Y fue este principio básico el que rechazó Galileo al decir que si no hay interferencia para un objeto en movimiento, se mantendrá moviéndose en línea recta por siempre; no hace falta un empujón, ni tracción ni fuerza.

Galileo demostró esta hipótesis experimentando con el movimiento de varios objetos sobre planos inclinados. Observó que las esferas que ruedan cuesta abajo en planos inclinados aumentaban su rapidez, en tanto que las que rodaban cuesta arriba perdían rapidez. Dedujo entonces que las esferas que ruedan por un plano horizontal ni se aceleran ni se desaceleran. La esfera llega al reposo finalmente no por su "naturaleza", sino por la fricción. Esta idea estaba respaldada



FIGURA 2.2
Movimiento de esferas en
diversos planos.

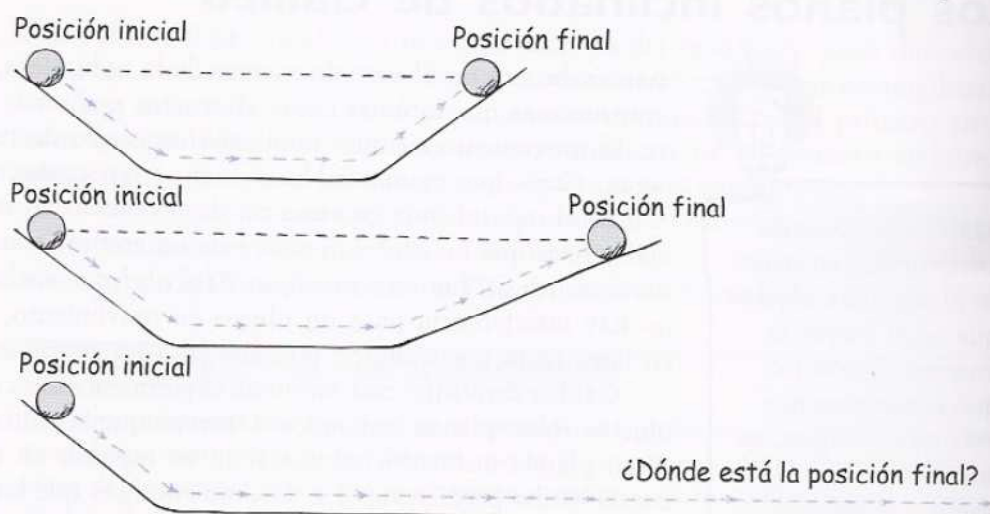
por la observación del Galileo mismo, del movimiento sobre superficies más lisas: cuando había menos fricción, el movimiento de los objetos duraba más: cuanto menos fricción, el movimiento se aproximaba más a una rapidez constante. Dedujo que en ausencia de la fricción o de otras fuerzas contrarias, un objeto en movimiento horizontal continuaría moviéndose indefinidamente.

A esta aseveración la apoyaban un experimento distinto y otra línea de razonamiento. Galileo colocó dos de sus planos inclinados uno frente a otro. Observó que una esfera, soltada desde el reposo en la parte superior de un plano inclinado hacia abajo, rodaba hacia abajo y después hacia arriba por la pendiente inclinada hacia arriba, hasta que casi llegaba a su altura inicial. Dedujo que sólo la fricción evitaba que subiera hasta llegar exactamente a la misma altura, porque cuanto más lisos fueran los planos, la esfera llegaría más cerca a la misma altura original. A continuación redujo el ángulo del plano inclinado hacia arriba. De nuevo, la bola subió casi hasta la misma altura, pero tuvo que ir más lejos. Con reducciones adicionales del ángulo obtuvo resultados parecidos: para alcanzar la misma altura, la esfera tenía que llegar más lejos cada vez. Entonces se preguntó: "Si tengo un plano horizontal largo. ¿hasta dónde debe llegar la esfera para alcanzar la misma altura?" La respuesta obvia es "hasta el infinito: nunca llegará a su altura inicial".²

Galileo analizó lo anterior todavía de forma diferente. Como el movimiento de bajada de la esfera en el primer plano es igual en todos los casos, su rapidez, al comenzar a subir por el segundo plano es igual en todos los casos. Si sube por una pendiente más inclinada pierde su rapidez rápidamente. En una pendiente menos inclinada la pierde con más lentitud, y rueda durante mayor tiempo. Cuanto menor sea la pendiente de subida, con más lentitud pierde su rapidez. En el caso extremo donde no hay pendiente, es decir, cuando el plano es horizontal, la esfera no debería perder rapidez alguna. En ausencia de fuerzas de retardo, la tendencia de la esfera es a moverse por siempre sin desacelerarse. A la propiedad de un objeto de resistirse a los cambios en el movimiento la llamó inercia.

El concepto de la inercia, debido a Galileo, desacreditó la teoría aristotélica del movimiento. Aristóteles no se dio cuenta del concepto de la inercia porque no se imaginó qué sería el movimiento sin fricción. Según su experiencia, todo movimiento estaba sometido a resistencia, y esta idea fue la piedra angular de su teoría de movimiento. La falla de Aristóteles en reconocer la fricción por lo

FIGURA 2.3
Una esfera que baja rodando por un plano inclinado (del lado izquierdo) tiende a subir rodando hasta su altura inicial (del lado derecho). La esfera debe rodar mayor distancia, conforme se reduce el ángulo de inclinación (del lado derecho).



² De la obra de Galileo: *Diálogos relacionados con las dos nuevas ciencias*.

que es, una fuerza como cualquier otra, impidió el progreso de la física durante casi 2,000 años, hasta la época de Galileo. Una aplicación del concepto de la inercia, según Galileo, hubiera demostrado que no se requiere fuerza alguna para mantener moviéndose a la Tierra. Se había abierto el camino para que Isaac Newton sintetizara una nueva visión del Universo.

EXAMÍNATE

¿Es correcto decir que la inercia es la *razón* por la cual un objeto en movimiento continúa moviéndose cuando no hay fuerza que actúe sobre él?

En 1642, varios meses después de la muerte de Galileo, nació Isaac Newton. A los 23 años ya había desarrollado sus famosas leyes del movimiento, que terminaron de demoler las ideas aristotélicas que habían dominado el razonamiento de los mejores pensadores durante casi dos milenios. En este capítulo explicaremos la primera de ellas. Se trata de un replanteamiento del concepto de inercia que propuso Galileo. (Las tres leyes de Newton sobre el movimiento aparecieron por primera vez en uno de los libros más importantes de todos los tiempos: los *Principia* de Newton.)

Primera ley de Newton del movimiento



Ley de Newton de la inercia
El viejo truco del mantel
Rollo de papel sanitario
Inercia de una pelota
Inercia de un cilindro
Inercia de un yunque

La idea aristotélica de que un objeto en movimiento debe estar impulsado por una fuerza continua fue demolida por Galileo, quien dijo que en *ausencia* de una fuerza, un objeto en movimiento continuará moviéndose. La tendencia de las cosas a resistir cambios en su movimiento fue lo que Galileo llamó *inercia*. Newton refinó esta idea de Galileo, y formuló su primera ley, que bien se llama ley de la inercia. En los *Principia* de Newton (traducido del original en latín):

Todo objeto continúa en su estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta, a menos que sea obligado a cambiar ese estado por fuerzas que actúen sobre él.

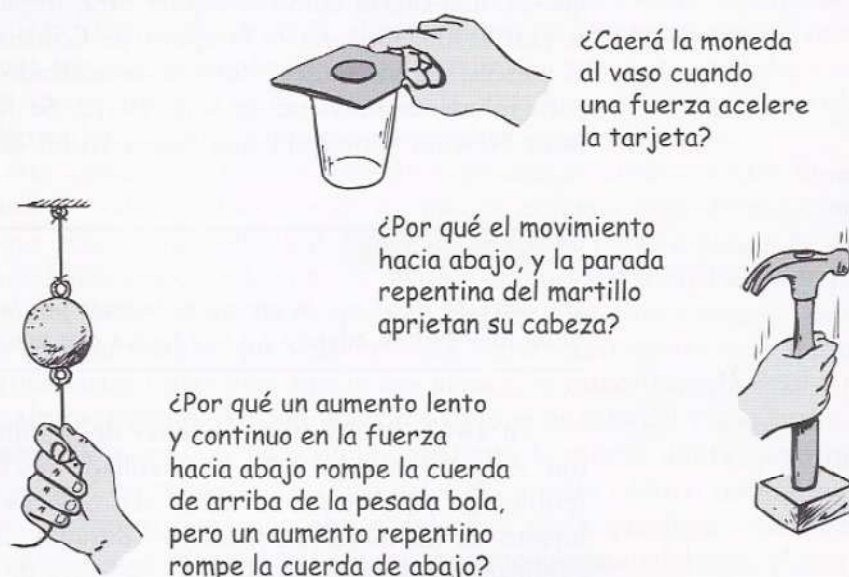
La palabra clave de esta ley es *continúa*: un objeto *continúa* haciendo lo que haga a menos que sobre él actúe una fuerza. Si está en reposo *continúa* en un estado de reposo. Esto se demuestra muy bien cuando un mantel se retira con habilidad por debajo de una vajilla colocada sobre una mesa y los platos quedan en su estado inicial de reposo. La propiedad de los objetos de resistir cambios en su movimiento se le llama *inercia*.

COMPRUEBA TU RESPUESTA

En el sentido estricto, no. No conocemos la razón por la que los objetos persisten en su movimiento cuando no hay fuerzas que actúen sobre ellos. Se llama *inercia* a la propiedad de los objetos materiales de comportarse en esta forma predecible. Comprendemos muchas cosas y tenemos nombres y etiquetas para ellas. Hay muchas cosas que no comprendemos, y también les ponemos nombres y etiquetas. La educación no consiste tanto en conocer nombres y etiquetas nuevas, sino en aprender qué fenómenos comprendemos y cuáles no.

FIGURA 2.4

Ejemplos de la inercia.



Si un objeto se mueve, continúa moviéndose sin girar ni cambiar su rapidez. Esto se ve en las sondas espaciales que se mueven continuamente en el espacio exterior. Se deben imponer cambios del movimiento contra la tendencia de un objeto a retener su estado de movimiento. En ausencia de fuerzas netas, un objeto en movimiento tiende a moverse indefinidamente a lo largo de una línea recta.

EXAMÍNATE

Un disco de hockey resbala por el hielo y al final se detiene. ¿Cómo interpretaría Aristóteles este comportamiento? ¿Cómo lo interpretarían Galileo y Newton? ¿Cómo lo interpretas tú? (*¡Piensa bien antes de leer las respuestas de abajo!*)

Fuerza neta

Los cambios de movimiento son producidos por una fuerza, o por una combinación de fuerzas (en el siguiente capítulo llamaremos *aceleración* a los cambios en el movimiento). Una **fuerza**, en el sentido más sencillo, es un empuje o un tirón. Su causa puede ser gravitacional, eléctrica, magnética o simplemente esfuerzo muscular. Cuando sobre un objeto actúa más que una sola fuerza, lo que se considera es la fuerza neta. Por ejemplo, si tú y un amigo tiran de un objeto en

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

Es probable que Aristóteles diría que el disco resbala y se para porque busca su estado propio y natural, que es el reposo. Galileo y Newton dirían probablemente que una vez en movimiento, el disco continuaría moviéndose y que lo que evita que continúe el movimiento no es su naturaleza ni su estado propio de reposo, sino la fricción que encuentra. Esta fricción es pequeña en comparación con la que hay entre el disco y un piso de madera, y es la causa de que sobre el hielo se deslice mucho más lejos. Sólo tú puedes contestar la última pregunta.

ISAAC NEWTON (1642 – 1727)



Isaac Newton nació prematuramente el día de Navidad de 1642, y apenas pudo sobrevivir. Su lugar de nacimiento fue la granja de su madre en Woolsthorpe, Inglaterra. Como su padre había muerto pocos meses antes, creció bajo el cuidado de su madre y su abuela. De niño no mostró señales específicas de brillantez, y a la edad de 14 años y medio lo sacaron de la escuela para que traba-

jara en la finca de su madre. Fue un fracaso como granjero, ya que prefería leer los libros que le prestaba un boticario vecino. Un tío captó el potencial intelectual del joven Isaac y lo animó a estudiar en la Universidad de Cambridge, lo cual hizo durante 5 años. Se graduó sin distinciones especiales.

Una peste azotó a Inglaterra y Newton se retiró a la finca de su madre, esta vez para continuar sus estudios. Allí, a los 23 y 24 años, estableció las bases del trabajo que lo haría inmortal. Al ver caer una manzana al suelo, pensó que la fuerza de gravedad se extiende hasta la Luna y más allá. También formuló la ley de la gravitación universal y la aplicó para resolver el enigma milenario del movimiento de los planetas y de las mareas del océano; inventó el cálculo, herramienta matemática indispensable de la ciencia. Amplió los trabajos de Galileo y formuló las tres leyes fundamentales del movimiento; también formuló una teoría sobre la naturaleza de la luz, y demostró, con prismas, que la luz blanca está formada por todos los colores del arco iris. En un inicio fueron sus experimentos con los prismas los que lo hicieron famoso.

Cuando cesó la peste, Newton regresó a Cambridge, y pronto estableció su reputación como matemático de primera línea. Su maestro de matemáticas renunció en su favor, y Newton fue contratado como profesor Lucasiano de matemáticas. Conservó este puesto durante 28 años. En 1672 fue elegido miembro de la Real Sociedad, donde demostró al mundo su primer telescopio reflector, el cual todavía se conserva en la biblioteca de la Real Sociedad, en Londres, con la inscripción: "El primer telescopio reflector, inventado por Sir Isaac Newton y construido con sus propias manos."

No fue sino hasta los 42 años de edad que comenzó a escribir lo que en general se considera el libro científico más grande que se haya escrito, *Principia Mathematica Philosophiae Naturalis*. Lo escribió en latín y lo terminó en 18 meses. Salió de la imprenta en 1687, y no se imprimió en inglés sino hasta 1729, dos años después de su muerte. Cuando se le preguntaba cómo pudo hacer tantos descubrimientos, Newton contestaba que llegó a las soluciones de los problemas no por repentina inspiración, sino meditando continua e intensamente durante mucho tiempo acerca de ellos, hasta que pudo resolverlos.

A la edad de 46 años sus energías se apartaron algo de la ciencia cuando fue electo miembro del Parlamento. Asistió durante dos años a esas sesiones, y nunca pronunció un discurso. Una vez se levantó y los asistentes quedaron en silencio para escuchar al gran hombre. El "discurso" de Newton fue breve; tan sólo pidió se cerrara una ventana, porque había una corriente de aire.

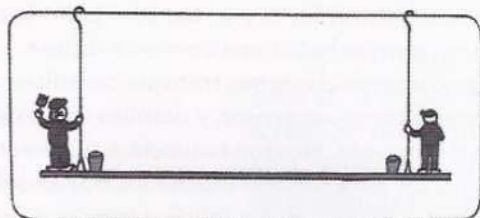
Se siguió apartando de sus trabajos científicos cuando fue contratado como supervisor, y después como director de la casa de moneda. Newton renunció a su cátedra y dirigió sus esfuerzos para mejorar mucho los trabajos de la moneda, para desgracia de los falsificadores que proliferaban en esa época. Mantuvo su membresía en la Real Sociedad y fue elegido presidente, y reelegido cada año por el resto de su vida. A los 62 años escribió *Opticks*, donde resumió sus trabajos sobre la luz. Nueve años después escribió una segunda edición de sus *Principia*.

Aunque el cabello Newton encaneció a los 30 años, siempre lo conservó abundante, largo y ondulado y, a diferencia de otros contemporáneos, no usó peluca. Era modesto, muy sensible a la crítica y nunca se casó. Permaneció saludable en cuerpo y alma hasta la vejez. A los 80 conservaba todos los dientes, su vista y oído eran agudos, y su mente permaneció lúcida. En su vida fue considerado por sus compatriotas como el más grande científico de todos los tiempos. En 1705 fue armado caballero por la reina Ana. Newton murió a los 85 años, y fue enterrado en la abadía de Westminster, junto con reyes y héroes de Inglaterra.

Newton demostró que el universo se rige por leyes naturales, que no son caprichosas ni malévolas; éste fue un conocimiento que despertó la esperanza y la inspiración de científicos, escritores, artistas, filósofos y personas de todos los andares de la vida que se dirigían a la Edad de la Razón. Las ideas y puntos de vista de Isaac Newton cambiaron verdaderamente al mundo y mejoraron la condición humana.

ENSAYO PERSONAL

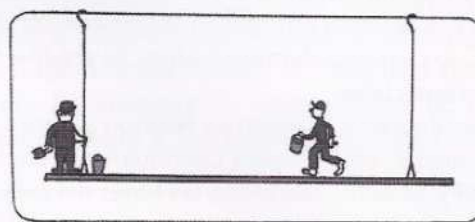
Cuando estaba en secundaria mi tutor me aconsejó no inscribirme en clases de ciencias y de matemáticas, y que mejor me enfocara hacia lo que parecía estar dotado: el arte. Seguí su consejo, y me interesé en dibujar historietas y en el boxeo, aunque en ninguno de los dos campos tuve mucho éxito. Después de cumplir con mi servicio militar probé suerte de nuevo pintando letreros, pero los fríos inviernos de Boston me impulsaron hacia el cálido Miami, en Florida. Ahí, a los 26 años de edad, conseguí un trabajo para pintar carteles y me encontré a Burl Grey, mi mentor intelectual. Al igual que yo, Burl nunca había estudiado física en la enseñanza intermedia. Pero le apasionaba la ciencia en general, y expresaba su pasión con muchas preguntas, cuando pintábamos juntos.



Recuerdo que Burl me preguntaba sobre las tensiones en las cuerdas que sostenían los andamios donde estábamos. Eran simples tablas horizontales colgadas de un par de cuerdas. Burl tiraba de la cuerda de su lado y me pedía hacer lo mismo de mi lado. Comparaba las tensiones de ambas cuerdas, para ver cuál era mayor. Burl era más pe-

sado que yo, y creía que la tensión de la cuerda de su lado era mayor. Como una cuerda de guitarra más tensada, la cuerda con mayor tensión vibraba con un tono más alto. La determinación de que la cuerda de Burl tenía más altura de tono parecía razonable, ya que sostenía más carga.

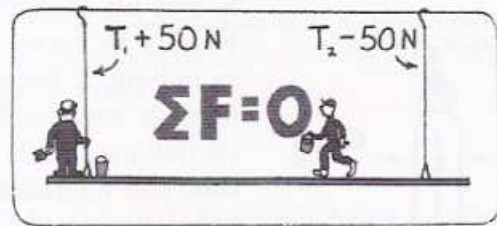
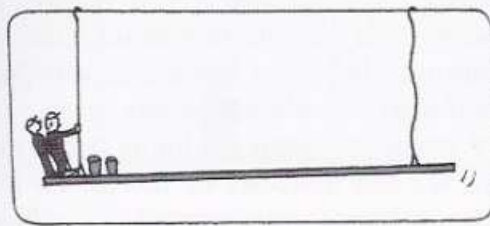
Cuando caminaba hacia Burl para que me prestara alguna de sus brochas, se preguntaba si cambiaban las tensiones en las cuerdas. ¿Aumenta la tensión de su cuerda al acercarme yo? Concordamos en que debía aumentar, ya que esa cuerda sostenía cada vez más peso. ¿Y la cuerda de mi lado? ¿Disminuiría su tensión? Estuvimos de acuerdo en que sí, porque estaba sosteniendo una parte menor de la carga total. No sabía entonces que estaba discutiendo sobre física.



Burl y yo exagerábamos para reforzar nuestros razonamientos (al igual que hacen los físicos). Si ambos nos parábamos en uno de los extremos del andamio y nos inclinábamos hacia afuera, era fácil de imaginar que el extremo opuesto de la tabla sería como el de un subibaja, y que la cuerda opuesta quedaría floja. Quiere decir que no

la misma dirección con fuerzas iguales, esas fuerzas se combinan y producen una fuerza neta que es dos veces mayor que tu propia fuerza. Si cada uno de ustedes tiran en direcciones *opuestas* con fuerzas iguales, la fuerza neta será cero. Las fuerzas iguales, pero con dirección opuesta, se anulan entre sí. Se puede considerar que una de las fuerzas es el negativo de la otra, y que se suman algebraicamente para dar cero, así que la fuerza neta resultante es cero.

La figura 2.5 muestra cómo se combinan las fuerzas para producir una fuerza neta. Un par de fuerzas de 5 libras en la misma dirección producen una fuerza neta de 10 libras. Si las fuerzas de 5 libras tienen direcciones opuestas, la fuerza neta es cero. Si 10 libras de fuerza se ejercen a la derecha y 5 libras a la izquierda, la fuerza neta es 5 libras hacia la derecha. Las fuerzas se representan con flechas. Una cantidad, como las fuerzas, que tiene magnitud y también dirección se llama *cantidad vectorial*. Las cantidades vectoriales se pueden representar por flechas cuya longitud y dirección indican la magnitud y la dirección de la cantidad. (Veremos más sobre vectores en el capítulo 4.)



había tensión en ella. A continuación dedujimos que la tensión en mi cuerda disminuiría en forma gradual conforme caminara hacia Burl. Era divertido hacernos estas preguntas y ver si las podíamos contestar.

Una pregunta que no pudimos responder fue si la disminución de la tensión en mi cuerda, al retirarme de ella, se compensaría *exactamente* con un aumento de tensión en la cuerda de Burl. Por ejemplo, si en mi cuerda disminuía en 50 newtons, ¿aumentaría en 50 newtons en la cuerda de Burl? (Entonces razonábamos en libras, pero aquí usaremos la unidad científica de fuerza, el *newton*, que se abrevia N.) ¿La ganancia sería *exactamente* 50 N? En ese caso, ¿sería una gran coincidencia? No conocí la respuesta, sino hasta un año después, cuando por estímulo de Burl abandoné mi oficio de pintor de tiempo completo y fui a la universidad para aprender más acerca de la ciencia.³

Ahí aprendí que se dice que cualquier objeto en reposo, como el andamio de pintor donde trabajaba con Burl, está en equilibrio. Esto es, todas las fuerzas que actúan sobre él se compensan y se obtiene cero. Así, la suma de las fuerzas hacia arriba, ejercidas por las cuerdas de soporte, sí son la suma de nuestros pesos más el peso

de la tabla. Una disminución de 50 N en una debe acompañarse de un aumento de 50 N en la otra.

Cuento todo esto, que es verídico, para señalar que las ideas de uno son muy distintas cuando no hay reglas que las guíen. Ahora cuando veo cualquier objeto en reposo se inmediatamente que todas las fuerzas que actúan sobre él se anulan. Vemos a la naturaleza en forma distinta cuando conocemos sus reglas. Sin las reglas de la física tendemos a ser supersticiosos y a ver magia donde no la hay. Es maravilloso que todo está relacionado con todo lo demás, mediante una cantidad sorprendentemente pequeña de reglas, y en una forma bellamente sencilla. Las reglas de la naturaleza es lo que estudia la física.

³ Tengo una deuda eterna con Burl Grey, por su estímulo, porque cuando continué con mi educación formal, lo hice con entusiasmo. Perdí contacto con Burl durante 40 años. Jayson Wechter, alumno de mi clase en el Exploratorium de San Francisco, detective privado, lo localizó en 1998 y nos puso en contacto. Con renovada amistad de nuevo continuamos las fogosas conversaciones.

FIGURA 2.5
La fuerza neta.



Fuerzas aplicadas	Fuerza neta

La regla del equilibrio

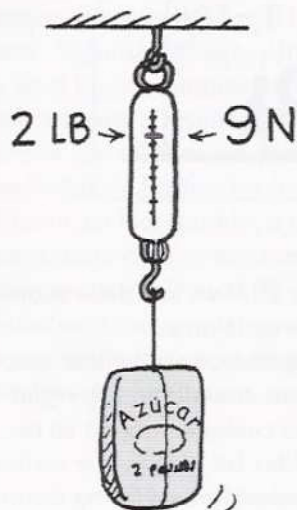


FIGURA 2.6

La tensión del cordón, que es hacia arriba, tiene la misma magnitud que el peso de la bolsa, por lo que la fuerza neta sobre la bolsa es cero.

Si con un cordón atas una bolsa con 2 libras de azúcar y la cuelgas de una báscula de mano (figura 2.6), el resorte de la báscula se estirará hasta que ésta indique 2 libras. El resorte estirado está bajo una “fuerza de estiramiento” llamada *tensión*. Es probable que la misma báscula en un laboratorio científico indique que la misma fuerza es 9 newtons. Tanto las libras como los newtons son unidades de peso, que a su vez son unidades de *fuerza*. La bolsa de azúcar es atraída hacia la Tierra con una fuerza gravitacional de 2 libras, o lo que es igual, de 9 newtons. Si cuelgas dos bolsas de azúcar iguales a la primera, la lectura será 18 newtons.

Nota que aquí son dos las fuerzas que actúan sobre la bolsa de azúcar: la fuerza de tensión que actúa hacia arriba, y su peso que actúa hacia abajo. Las dos fuerzas sobre la bolsa son iguales y opuestas y se anulan; la fuerza neta es cero. Por consiguiente la bolsa permanece en reposo. De acuerdo con la primera ley de Newton ninguna fuerza neta actúa sobre la bolsa. Podemos ver la primera ley de Newton con una luz diferente: *el equilibrio mecánico*.

Cuando la fuerza neta que actúa sobre algo es cero, se dice que ese algo está en **equilibrio mecánico**.⁴ En notación matemática, la regla del equilibrio es

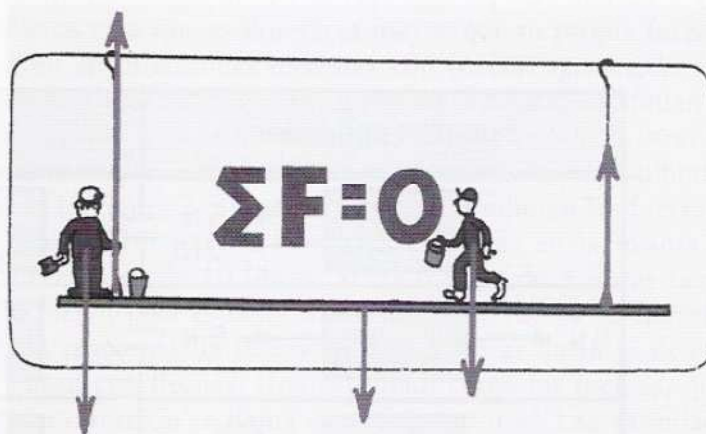
$$\Sigma F = 0$$

El símbolo Σ representa “la suma vectorial de” y F representa “fuerzas”. Para un objeto suspendido en reposo, como la bolsa de azúcar, la regla dice que las fuerzas que actúan hacia arriba sobre algo que está en reposo deben estar equilibradas por otras fuerzas que actúan hacia abajo, para que la suma vectorial sea igual a cero. (Las cantidades vectoriales tienen en cuenta la dirección, por lo que las fuerzas hacia arriba son $+$ y las fuerzas hacia abajo son $-$; cuando se suman en realidad se restan.)

En la figura 2.7 vemos las fuerzas que intervienen cuando Burl y Hewitt pintan un letrero sobre una tabla. La suma de tensiones hacia arriba es igual a la suma de sus pesos más el peso de la tabla. Observa cómo las magnitudes de los dos vectores hacia arriba son iguales a las magnitudes de los tres vectores hacia abajo. La fuerza neta sobre la tabla es cero, por lo que decimos que está en equilibrio mecánico.

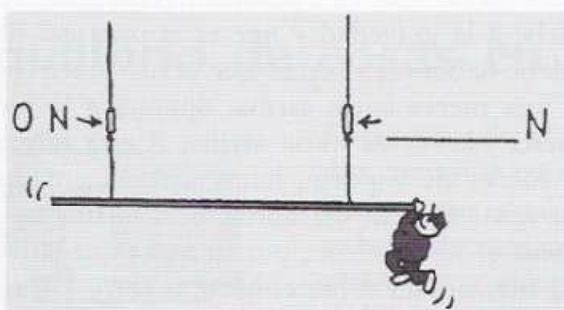
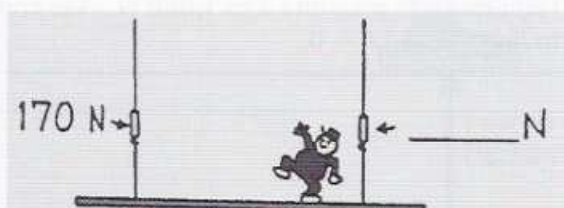
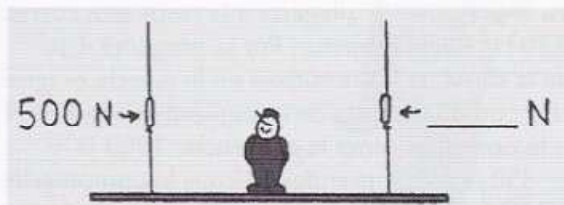
FIGURA 2.7

La suma de los vectores hacia arriba es igual a la suma de los vectores hacia abajo. $\Sigma F = 0$ y la tabla está en equilibrio.

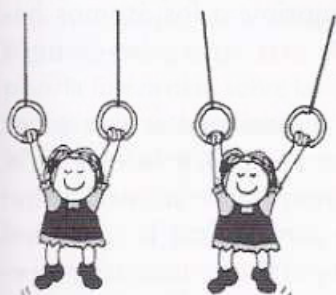


⁴ En el capítulo 8 explicaremos que otra condición para el equilibrio mecánico es que el momento de torsión neto sea igual a cero.

CUADRO DE PRÁCTICA



1. Cuando Burl está solo exactamente a la mitad de esta tabla, la báscula de la izquierda indica 500 N. Anota la lectura de la báscula derecha. El peso total de Burl y la tabla debe ser _____ N.
2. Burl se aleja de la izquierda. Anota la indicación de la báscula de la derecha.
3. Por diversión, Burl se cuelga del extremo derecho. Anota la lectura de la báscula de la derecha.



Todo lo que no experimente cambios de movimiento está en equilibrio mecánico. Esto es porque $\Sigma F = 0$.

¡EUREKA!

EXAMÍNATE

Observa la gimnasta que cuelga de las argollas.

1. Si ella cuelga con su peso dividido por igual entre las dos argollas, ¿qué indicarían unas básculas colocadas en las cuerdas, en comparación con el peso de ella?
2. Supón que su peso cuelga un poco más de la argolla izquierda. ¿Qué marcaría una báscula en la cuerda derecha?

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

(¿Estás leyendo esto antes de haber formulado respuestas razonables en tu mente? Si es así, pregúntate ¿ejercitas tu cuerpo, viendo que otros hacen logartijas? Ejercita tu mente: cuando encuentres las numerosas preguntas de Examínate que hay en este libro, ¡piensa antes de comprobar más abajo las respuestas!)

1. La indicación de cada báscula sería la mitad de su peso. La suma de las lecturas de las dos básculas es igual, por consiguiente, a su peso.
2. Cuando la argolla izquierda sostiene más de su peso, la indicación en la derecha es menos de la mitad de su peso. No importa cómo se cuelgue, la suma de las lecturas de la báscula es igual a su peso. Por ejemplo, si una báscula indica las dos terceras partes de su peso, la otra indicará un tercio de su peso. ¿Comprendiste?

RESPUESTAS DEL CUADRO DE PRÁCTICA

¿Tus respuestas ilustran la regla del equilibrio? En la pregunta 1, la cuerda derecha debe tener una tensión de **500 N**, porque Burl está a la mitad de la tabla, y ambas cuerdas sostienen su peso por igual. Como la suma de las tensiones hacia arriba es 1,000 N, el peso total de Burl y la tabla debe ser **1,000 N**. Llamaremos +1,000 N a las fuerzas de tensión hacia arriba. Entonces los pesos hacia abajo son -1,000 N. ¿Qué sucede si sumas +1,000 N y -1,000 N? La respuesta es que esa suma es igual a cero. Vemos así que $\Sigma F = 0$.

Para la pregunta 2, ¿llegaste a la respuesta correcta, que es 830 N? Razonamiento: Por la pregunta 1 se sabe que la suma de las tensiones en la cuerda es igual a 1,000 N, y como la cuerda de la izquierda tiene 170 N de tensión, la otra debe tener la diferencia: $1000 \text{ N} - 170 \text{ N} = 830 \text{ N}$. ¿Comprendes? Bien si lo comprendes. Si no, habla de eso con tus amigos. Después lee más.

La respuesta a la pregunta 3 es **1,000 N**. ¿Ves cómo todo esto ilustra que $\Sigma F = 0$.

Fuerza de soporte

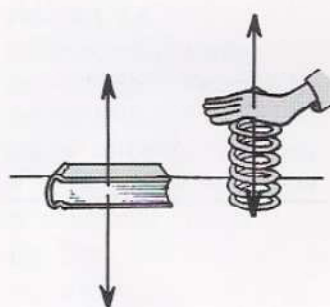


FIGURA 2.8

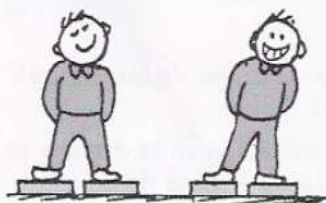
(Izquierda) La mesa empuja el libro hacia arriba, con igual fuerza que la de gravedad, que tira del libro hacia abajo. (Derecha) El resorte empuja tu mano hacia arriba, con tanta fuerza como la que ejerzas para oprimir el resorte.

Imagina un libro que yace sobre una mesa. Está en equilibrio. ¿Qué fuerzas actúan sobre él? Una es la que se debe a la gravedad y que es el *peso* del libro. Como el libro está en equilibrio, debe haber otra fuerza que actúa sobre él que haga que la fuerza neta sea cero: una fuerza hacia arriba, opuesta a la fuerza de gravedad. La mesa es la que ejerce esa fuerza hacia arriba. A esta fuerza se le llama *fuerza de soporte*. Esta fuerza de soporte, hacia arriba, a menudo se llama *fuerza normal* y debe ser igual al peso del libro.⁵ Si a la fuerza normal la consideramos positiva, el peso es hacia abajo, por lo que es negativo, y al sumarse las dos resulta cero. La fuerza neta sobre el libro es cero. Otra forma de decir lo mismo es $\Sigma F = 0$.

Para entender mejor que la mesa empuja el libro hacia arriba, compara el caso de la compresión de un resorte (figura 2.8). Comprime el resorte hacia abajo, y podrás sentir que el resorte empuja tu mano hacia arriba. Asimismo, el libro que yace sobre la mesa comprime los átomos de ésta, que se comportan como resortes microscópicos. El peso del libro comprime a los átomos hacia abajo, y ellos comprimen el libro hacia arriba. De esta forma los átomos comprimidos producen la fuerza de soporte.

Cuando te subes en una báscula de baño hay dos fuerzas que actúan sobre ella. Una es el tirón de la gravedad, hacia abajo, que es tu peso, y la otra es la fuerza de soporte, hacia arriba del piso. Estas fuerzas comprimen un mecanismo (en efecto, un resorte) en la báscula que está calibrado para indicar la magnitud de la fuerza de soporte (figura 2.9). Es esta fuerza de soporte que muestra tu peso. Cuando te pesas en una báscula de baño en reposo, la fuerza de soporte y la fuerza de gravedad que te jala hacia abajo tienen la misma magnitud. Por lo tanto, decimos que tu peso es la fuerza de gravedad que actúa sobre ti.

EXAMÍNA TE



1. ¿Cuál es la fuerza neta sobre una báscula de baño cuando sobre ésta se para un individuo que pesa 150 libras?
2. Supón que te paras en dos básculas de baño, y que tu peso se reparte por igual entre ambas. ¿Cuánto indicará cada una? ¿Y si descansas más de tu peso en un pie que en el otro?

⁵ Esta fuerza actúa formando ángulo recto con la superficie de la mesa. Cuando se dice que es "normal a" significa que está "en ángulo recto con", por lo cual a esta fuerza la llamamos fuerza normal.



FIGURA 2.9

El soporte hacia arriba es igual a la fuerza de gravedad hacia abajo.

Equilibrio de cosas en movimiento



FIGURA 2.10

Cuando el empuje sobre la caja es igual que la fuerza de fricción entre la caja y el piso, la fuerza neta sobre la caja es cero, y se desliza con una rapidez constante.

El reposo sólo es una forma de equilibrio. Un objeto que se mueve con rapidez constante en una trayectoria rectilínea también está en equilibrio. El equilibrio es un estado donde no hay cambios. Una bola de bolos que rueda a rapidez constante en línea recta también está en equilibrio, hasta que golpea los pinos. Si un objeto está en reposo (equilibrio estático) o rueda uniformemente en línea recta (equilibrio dinámico), $\Sigma F = 0$.

De acuerdo con la primera ley de Newton, un objeto que sólo esté bajo la influencia de una fuerza no puede estar en equilibrio. La fuerza neta no podría ser cero. Únicamente cuando actúan sobre él dos o más fuerzas puede estar en equilibrio. Podemos probar si algo está en equilibrio o no, observando si sufre cambios en su estado de movimiento o no.

Imagina una caja que se empuja horizontalmente por el piso de una fábrica. Si se mueve a una rapidez constante, y su trayectoria es una línea recta, está en equilibrio dinámico. Esto nos indica que sobre la caja actúa más de una fuerza. Existe otra, que es probablemente la fuerza de fricción entre la caja y el piso. El hecho de que la fuerza neta sobre la caja sea igual a cero significa que la fuerza de fricción debe ser igual y opuesta a la fuerza de empuje.

La regla de equilibrio, $\Sigma F = 0$, brinda una forma razonada de observar todas las cosas en reposo: pilas de piedras, objetos de tu habitación o las vigas de

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Cero, porque la báscula permanece en reposo. La báscula indica la fuerza de soporte, que tiene la misma magnitud que el peso; no indica la fuerza neta.
2. La indicación de cada báscula es la mitad de tu peso. Esto se debe a que la suma de las indicaciones de las básculas, que es igual a la fuerza de soporte que ejerce el piso, debe equilibrarse con tu peso, para que la fuerza neta sobre ti sea cero. Si te inclinas más sobre una báscula que sobre la otra, aquélla indicará más de la mitad de tu peso, pero la segunda menos de la mitad, y la suma de ambas lecturas seguirá siendo tu peso. Al igual que el ejemplo de la gimnasta que cuelga de las argollas, si una báscula indica dos tercios de tu peso, la otra indicará un tercio del mismo.

acero de los puentes o en la construcción de edificios. Cualquiera que sea su configuración, en equilibrio estático, todas las fuerzas que actúan siempre se equilibran a cero. Lo mismo es cierto para los objetos que se mueven constantemente, sin acelerar, desacelerar ni cambiar de dirección. Para el equilibrio dinámico, todas las fuerzas que actúan también se equilibran a cero. La regla del equilibrio permite que veas mejor que el ojo del observador casual. Resulta agradable saber las razones de la estabilidad de los objetos en el mundo actual.

Hay distintas formas de equilibrio. En el capítulo 8 hablaremos sobre el equilibrio en rotación y, en la parte 4, del equilibrio térmico asociado con el calor. La física está en todos lados.

EXAMÍNA TE



Un avión vuela a rapidez constante en una trayectoria recta y horizontal. En otras palabras, el avión está en equilibrio cuando vuela. Sobre él actúan dos fuerzas horizontales. Una es el empuje de la hélice, la cual lo impulsa hacia adelante. La otra es la resistencia del aire, que actúa en la dirección opuesta. ¿Cuál de ellas es mayor?

La Tierra en movimiento

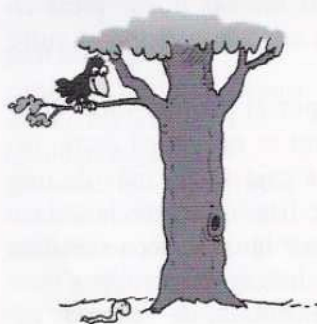


FIGURA 2.11

¿El ave puede dejarse caer y atrapar al gusano, si la Tierra se mueve a 30 km/s?

Cuando Copérnico anunció su idea de una Tierra en movimiento, en el siglo XVI, no se entendía aún el concepto de la inercia. Había muchos argumentos y debates acerca de si la Tierra se mueve o no. La cantidad de fuerza necesaria para mantener la Tierra en movimiento escapaba a la imaginación. Otro argumento contra una Tierra en movimiento era el siguiente: imagina a una ave parada en reposo en la copa de un árbol muy alto. En el suelo, abajo de él, está un gusano gordo y jugoso. El ave lo observa y se deja caer verticalmente y lo atrapa. Esto sería imposible, se afirma, si la Tierra se moviera como lo sugirió Copérnico. Si él hubiera tenido razón, la Tierra tendría que viajar a una rapidez de 107,000 kilómetros por hora para describir un círculo alrededor del Sol en un año. Al convertir esta rapidez en kilómetros por segundo el resultado es 30 kilómetros por segundo. Aun si el ave pudiera descender de su rama en un segundo, el gusano habría sido desplazado 30 kilómetros por el movimiento de la Tierra. Sería imposible que una ave se dejara caer directamente y atrapara al gusano. Pero las aves sí atrapan gusanos desde las ramas altas de los árboles, y eso parecía una prueba evidente de que la Tierra debía estar en reposo.

¿Puedes refutar este argumento? Puedes hacerlo, si invocas la idea de la inercia. Ya ves, no sólo la Tierra se mueve a 30 kilómetros por segundo, sino también el árbol, su rama, el ave parada en ésta, el gusano que está en el suelo y hasta el aire que hay entre los dos. Todos se mueven a 30 kilómetros por segundo. Las cosas que se mueven siguen en movimiento si no actúa sobre ellas alguna fuerza no equilibrada. Entonces, cuando el ave se deja caer desde la ra-

COMPRUEBA TU RESPUESTA

Las dos fuerzas tienen la misma magnitud. Llamemos positiva a la fuerza de avance que ejerce la hélice. La resistencia del aire es negativa. Como el avión está en equilibrio dinámico, ¿puedes ver que las dos fuerzas se combinan y que el resultado es cero? Por lo tanto, ni gana ni pierde rapidez.



FIGURA 2.12

Cuando lanzas una moneda dentro de un avión que viaja a gran rapidez, se comporta como si el avión estuviera en reposo. La moneda sigue contigo. ¡Es la inercia en acción!

ma, su velocidad inicial lateral de 30 kilómetros por segundo no cambia. Atrapa al gusano sin que los afecte el movimiento de su entorno total.

Párate junto a una pared. Salta de manera que tus pies no toquen al piso. ¿El muro te golpea a 30 kilómetros por segundo? No lo hace, porque también tú te mueves a 30 kilómetros por segundo, antes, durante y después de tu salto. Los 30 kilómetros por segundo es la rapidez de la Tierra en relación con el Sol, y no la del muro en relación contigo.

Hace 400 años las personas tenían dificultad para entender ideas como éstas, no sólo porque desconocían el concepto de la inercia, sino porque no estaban acostumbradas a moverse en vehículos con gran rapidez. Los viajes lentos y agitados en carruajes tirados por caballos no se prestaban a hacer experimentos que indicaran los efectos de la inercia. En la actualidad podemos lanzar una moneda en un automóvil, en un autobús o en un avión que viajen a gran rapidez, y la atrapamos, con su movimiento vertical, como si el vehículo estuviera en reposo. Vemos la evidencia de la ley de la inercia cuando el movimiento horizontal de la moneda es igual antes, durante y después de atraparla. La moneda sigue con nosotros. La fuerza vertical de la gravedad sólo afecta el movimiento vertical de la moneda.

Actualmente nuestras nociones sobre el movimiento son muy diferentes de las de nuestros antepasados. Aristóteles no se dio cuenta del concepto de la inercia porque no vio que todas las cosas en movimiento siguen las mismas reglas. Imaginó que las reglas del movimiento en los cielos eran muy diferentes a sus correspondientes en la Tierra. Vio que el movimiento vertical es natural, pero que el horizontal no era natural porque requería de una fuerza sostenida. Por otro lado, Galileo y Newton consideraron que todos los objetos en movimiento siguen las mismas reglas. Para ellos, los objetos en movimiento no requieren fuerza que los mantenga en movimiento, si no hay fuerzas que se opongan al mismo, como la fricción. Podemos imaginar cuán distinto hubiera avanzado la ciencia si Aristóteles hubiera reconocido la unidad de todas las clases de movimiento.

Resumen de términos

Equilibrio mecánico Estado de un objeto o sistema de objetos en el cual no hay cambios de movimiento.

De acuerdo con la primera ley de Newton, si están en reposo, persiste el estado de reposo. Si están en movimiento, el movimiento continúa sin cambiar.

Fuerza En el sentido más simple, un empuje o un tirón.

Inercia La propiedad de las cosas de resistir cambios de movimiento.

Primera ley de Newton del movimiento (ley de la inercia)

Todo objeto continúa en su estado de reposo, o de movimiento uniforme en línea recta, a menos que sea obligado a cambiar ese estado por fuerzas que actúen sobre él.

Regla del equilibrio En cualquier objeto o sistema de objetos en equilibrio, la suma de las fuerzas que actúan es igual a cero. En forma de ecuación. $\Sigma F = 0$.

Preguntas de repaso

En este libro, cada capítulo termina con un conjunto de preguntas de repaso, ejercicios y de problemas de repaso en algunos capítulos. En algunos capítulos hay un conjunto de problemas numéricos de un

solo paso cuya finalidad es que te familiarices con las ecuaciones del capítulo: **Cálculos de un paso**. Las **preguntas de repaso** tienen como finalidad ayudarte a fijar tus ideas y a captar la esencia del material del capítulo. Observarás que en el capítulo puedes encontrar las respuestas a estas preguntas. Los **ejercicios** hacen hincapié en las ideas, más que sólo recordar la información y pedir la comprensión de las definiciones, los principios y las relaciones en el material del capítulo. En muchos casos, la intención de algunos ejercicios es ayudarte a aplicar las ideas de la física a situaciones que te sean familiares. A menos que sólo estudies unos pocos capítulos de tu curso, es probable que debas resolver sólo algunos ejercicios en cada capítulo. Debes expresar las respuestas en oraciones completas, explicando o realizando esquemas cuando sea necesario. El gran número de ejercicios que hay es para permitir a tu maestro elegir una gran variedad de tareas. Los **problemas** van más allá de los cálculos de un paso y tienen que ver con conceptos que se entienden con mayor claridad usando cálculos desafiantes. En el material complementario de esta obra hay problemas adicionales.

El movimiento, según Aristóteles

1. Contrasta las ideas de Aristóteles acerca del movimiento natural y del movimiento violento.
2. ¿Qué clase de movimiento natural o violento, atribuía Aristóteles a la Luna?

3. ¿Qué estado de movimiento atribuía Aristóteles a la Tierra?

Copérnico y la Tierra en movimiento

4. ¿Qué relación estableció Copérnico entre el Sol y la Tierra?

Galileo y la Torre inclinada

5. ¿Qué descubrió Galileo en su legendario experimento en la Torre Inclinada de Pisa?

Los planos inclinados de Galileo

6. ¿Qué descubrió Galileo acerca de los cuerpos en movimiento y las fuerzas, en sus experimentos con planos inclinados?
7. ¿Qué quiere decir que un objeto en movimiento tiene inercia? Describe un ejemplo.
8. ¿La inercia es la razón de que los objetos en movimiento se mantengan en movimiento, o es el nombre que se da a esta propiedad?

Primera ley de Newton del movimiento

9. Cita la primera ley de Newton del movimiento.

Fuerza neta

10. ¿Cuál es la fuerza neta sobre un carro que es tirado con 100 libras hacia la derecha y con 30 libras hacia la izquierda?
11. ¿Por qué se dice que la fuerza es una cantidad vectorial?

La regla del equilibrio

12. ¿La fuerza se puede expresar en libras y también en newtons?
13. ¿Cuál es la fuerza neta sobre un objeto del cual se tira con 80 newtons hacia la derecha y con 80 newtons hacia la izquierda?
14. ¿Cuál es la fuerza neta sobre una bolsa en la cual la gravedad tira hacia abajo con 18 newtons, y de la cual una cuerda tira hacia arriba con 18 newtons?
15. ¿Qué significa decir que algo está en equilibrio mecánico?
16. Enuncia con símbolos la regla del equilibrio.

Fuerza de soporte

17. Un libro que pesa 15 N descansa sobre una mesa plana. ¿Cuántos newtons de fuerza de soporte debe ejercer la mesa? ¿Cuál es la fuerza neta sobre el libro en este caso?
18. Cuando te paras sin moverte sobre una báscula de baño, ¿cómo se compara tu peso con la fuerza de soporte de esta báscula?

Equilibrio de objetos en movimiento

19. Una bola de bolos en reposo está en equilibrio. ¿También está en equilibrio cuando se mueve con una rapidez constante en trayectoria rectilínea?

20. ¿Cuál es la prueba para decir si un objeto en movimiento está o no en equilibrio?
21. Si empujas una caja con una fuerza de 100 N, y se desliza en línea recta con rapidez constante, ¿cuánta fricción actúa sobre la caja?

La Tierra en movimiento

22. ¿Qué concepto faltaba en el pensamiento de los seres humanos del siglo XVI, que no podían creer que la Tierra estuviera en movimiento?
23. Una ave parada sobre un árbol se mueve a 30 km/s en relación con el lejano Sol. Cuando se deja caer al suelo bajo él, ¿todavía va a 30 km/s, o esa rapidez se vuelve cero?
24. Párate junto a un muro que se mueva a 30 km/s en relación con el Sol, y salta. Cuando tus pies están sobre el piso, también tú te mueves a 30 km/s. ¿Sostienes esta rapidez cuando tus pies se despegan del piso? ¿Qué concepto respalda tu respuesta?
25. ¿De qué no pudo darse cuenta Aristóteles acerca de las reglas de la naturaleza para los objetos en la Tierra y en los cielos?

Proyecto

Pídele a un amigo que clave una tachuela en un trozo de madera colocado en la cima de una pila de libros colocados sobre tu cabeza. ¿Por qué no te lastima?



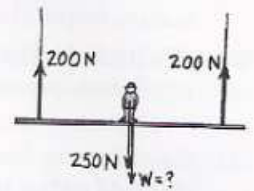
Ejercicios

Por favor, no te intimides por el gran número de ejercicios en este libro. Si el objetivo de tu curso es estudiar muchos capítulos, es probable que tu profesor sólo te pida resolver unos cuantos de cada capítulo.

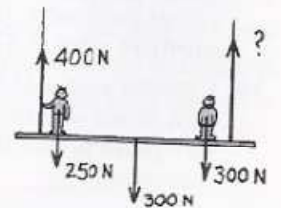
1. Una bola que rueda por el piso no continúa rodando indefinidamente. ¿Esto es porque busca un lugar de reposo o porque alguna fuerza actúa sobre ella? Si hay una fuerza ¿cuál sería ésta?
2. Copérnico postuló que la Tierra se mueve en torno al Sol (y no lo contrario); pero se le complicó la idea. ¿Qué conceptos de la mecánica le faltaron (que después fueron introducidos por Galileo y Newton) que hubieran disipado sus dudas?
3. ¿Qué idea aristotélica desacreditó Galileo en su legendaria demostración de la Torre Inclinada?
4. ¿Qué idea aristotélica demolió Galileo con sus experimentos con planos inclinados?
5. ¿Quién introdujo primero el concepto de inercia, Galileo o Newton?

6. Los asteroides han estado moviéndose por el espacio durante miles de millones de años. ¿Qué los mantiene en movimiento?
7. Una sonda espacial puede ser conducida por un cohete hasta el espacio exterior. ¿Qué mantiene el movimiento de la sonda después de que el cohete ya no la sigue impulsando?
8. Al contestar la pregunta "¿qué mantiene a la Tierra moviéndose alrededor del Sol?", un amigo tuyo asegura que la inercia la mantiene en movimiento. Corrige esa aseveración errónea.
9. Tu amigo dice que la inercia es una fuerza que mantiene las cosas en su lugar, ya sea en reposo o en movimiento. ¿Estás de acuerdo? ¿Por qué?
10. Otro de tus amigos dice que las organizaciones burocráticas tienen mucha inercia. ¿Se parece a la primera ley de Newton de la inercia?
11. Una bola está en reposo en medio de un coche de juguete. Cuando se hace avanzar al coche, la bola rueda contra su parte trasera. Interpreta esta observación en términos de la primera ley de Newton.
12. Al jalar una toalla de papel o una bolsa de plástico para desprenderlas de un rollo, ¿por qué es más efectivo un tirón brusco que uno gradual?
13. Si estás dentro de un automóvil en reposo que es golpeado en la parte trasera, podrías sufrir una severa lesión llamada latigazo cervical. ¿Qué tiene que ver esta lesión con la primera ley de Newton?
14. En términos de la primera ley de Newton (la ley de la inercia), ¿cómo puede ayudar la cabecera del asiento en un automóvil a proteger la nuca en un choque por atrás?
15. ¿Por qué te tambaleas hacia adelante dentro de un autobús que se detiene de repente? ¿Por qué te tambaleas hacia atrás cuando acelera? ¿Qué leyes se aplican en este caso?
16. Supón que vas en un automóvil en movimiento y que el motor se apaga. Pisas el freno y lentamente el carro disminuye su rapidez a la mitad. Si sueltas el freno el automóvil acelerará un poco o continuará reduciendo su rapidez debido a la fricción? Sustenta tu respuesta.
17. Cada vértebra de la serie que forma tu columna dorsal está separada por discos de tejido elástico. ¿Qué sucede entonces cuando saltas desde un lugar elevado y caes de pie? (Sugerencia: imagínate la cabeza del martillo de la figura 2.4.) ¿Puedes imaginar alguna causa de que seas un poco más alto por la mañana que la noche anterior?
18. Empuja un carrito y se moverá. Cuando dejas de empujarlo, se detiene. ¿Viola esto la ley de inercia de Newton? Sustenta tu respuesta.
19. Suelta una bola por una mesa de bolos, y verás que con el tiempo se mueve con más lentitud. ¿Viola eso la ley de inercia de Newton? Sustenta tu respuesta.
20. En un par de fuerzas, una tiene 20 N de magnitud y la otra 12 N. ¿Cuál fuerza neta máxima es posible tener con estas dos fuerzas? ¿Cuál es la fuerza neta mínima posible?

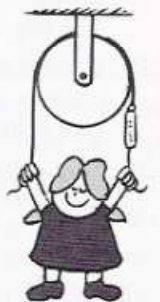
21. Cuando un objeto está en equilibrio mecánico, ¿qué puede decirse correctamente acerca de todas las fuerzas que actúan en él? ¿La fuerza neta necesariamente debe ser cero?
22. Un mono está colgado en reposo de una liana. ¿Cuáles son las dos fuerzas que actúan sobre el mono? ¿Alguna es mayor?
23. ¿Puede un objeto estar en equilibrio mecánico cuando sólo hay una fuerza que actúe sobre él? Explica por qué.
24. Cuando se arroja una bola hacia arriba, se detiene momentáneamente en la cumbre de su trayectoria. ¿Está en equilibrio durante este breve instante? ¿Por qué?
25. Un disco de hockey se desliza por el hielo a rapidez constante. ¿Está en equilibrio? ¿Por qué?
26. El esquema de a lado muestra un andamio de pintor que está en equilibrio mecánico. La persona en medio de él pesa 250 N, y las tensiones en cada cuerda son de 200 N. ¿Cuál es el peso del andamio?



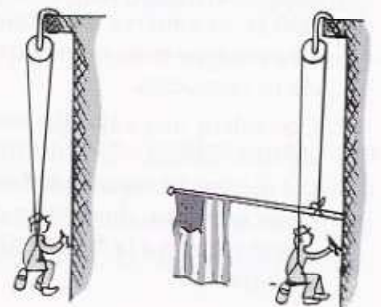
27. Otro andamio pesa 300 N y sostiene a dos pintores, uno que pesa 250 N y el otro 300 N. La indicación del medidor de la izquierda es 400 N. ¿Cuál será la indicación del medidor de la derecha?



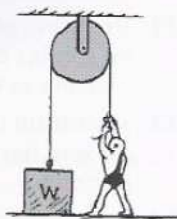
28. Nelly Newton cuelga en reposo de los extremos de la cuerda, como muestra la figura. ¿Cómo se compara la indicación de la báscula con su peso?



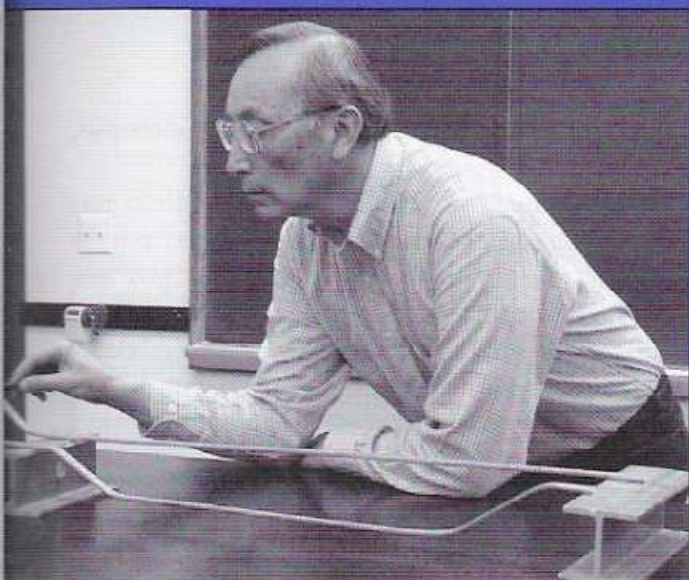
29. Harry el pintor se cuelga de su silla año tras año. Pesa 500 N y no sabe que la cuerda tiene un punto de rotura de 300 N. ¿Por qué la cuerda no se rompe cuando lo sostiene como se ve en el lado izquierdo de la figura? Un día Harry pinta cerca de un asta-bandera, y para cambiar, amarra el extremo libre de la cuerda al asta, en vez de a su silla, como en la figura derecha. ¿Por qué tuvo que tomar anticipadamente sus vacaciones?



30. ¿Podrías afirmar que ninguna fuerza actúa sobre un cuerpo en reposo? ¿O es correcto decir que ninguna fuerza neta actúa sobre él. Defiende tu respuesta.
31. Para el sistema con polea que se ve abajo, ¿cuál es el límite superior de peso que puede levantar el fortachón?



32. Si el fortachón del ejercicio anterior ejerce una fuerza hacia abajo de 800 N en la cuerda, ¿cuánta fuerza hacia arriba ejerce sobre el bloque?
33. La fuerza de gravedad jala hacia abajo un libro que está sobre una mesa. ¿Qué fuerza evita que el libro acelere hacia abajo?
34. ¿Cuántas fuerzas significativas actúan sobre un libro en reposo que está sobre una mesa? Menciona esas fuerzas.
35. Considera la fuerza normal sobre un libro en reposo que está sobre la superficie de una mesa. Si la mesa está inclinada de manera que la superficie forme un plano inclinado, ¿cambiará la magnitud de la fuerza normal? ¿Por qué?
36. Cuando empujas hacia abajo un libro en reposo que está sobre una mesa, ¿sientes una fuerza hacia arriba? ¿Esta fuerza depende de la fricción? Defiende tu respuesta.
37. Cuando te paras, ¿el piso ejerce una fuerza hacia arriba contra tus pies? ¿Cuánta fuerza ejerce? ¿Por qué esa fuerza no te mueve hacia arriba?
38. Coloca un libro pesado sobre una mesa; la mesa lo empuja hacia arriba. ¿Por qué esa fuerza no hace que el libro se levante de la mesa?
39. Una jarra vacía con peso W descansa sobre una mesa. ¿Cuál es la fuerza de soporte que la mesa ejerce sobre la jarra? ¿Cuál es la fuerza de soporte cuando se vierte en la jarra agua que pesa W ?
40. Si tiras horizontalmente de una caja con una fuerza de 200 N, la caja se deslizará por el piso en equilibrio dinámico. ¿Cuánta fricción actúa sobre la caja?
41. Para deslizar un armario pesado por el piso a una rapidez constante, tu ejerce una fuerza horizontal de 600 N. ¿La fuerza de fricción entre el armario y el piso es mayor que, menor que o igual a 600 N? Defiende tu respuesta.
42. Considera una caja que está en reposo sobre el piso de una fábrica. Cuando dos trabajadores la levantan, ¿la fuerza de soporte sobre la caja dada por el piso se incrementa, disminuye o permanece sin cambio? ¿Qué sucede a la fuerza de soporte sobre los pies del trabajador?
43. Cada una de dos personas tira de una cuerda con una fuerza de 300 N en un juego de tira y afloja. ¿Cuál es la fuerza neta sobre la cuerda? ¿Cuánta fuerza es ejercida en cada persona por la cuerda?
44. Sobre un paracaidista que desciende en el aire actúan dos fuerzas: su peso y la resistencia del aire. Si el descenso es uniforme, sin ganancia ni pérdida de rapidez, el paracaidista está en equilibrio dinámico. ¿Cómo comparas las magnitudes del peso y de la resistencia del aire?
45. Antes de la época de Galileo y Newton, algunos sabios pensaban que una piedra que se deja caer desde la punta de un mástil alto de un barco en movimiento caería verticalmente y llegaría a la cubierta atrás del mástil, a una distancia igual a la que había avanzado el barco mientras la piedra caía. A la luz de lo que captas de la primera ley de Newton, ¿qué piensas acerca de esto?
46. Como la Tierra gira una vez cada 24 horas, la pared oeste de tu recámara se mueve en una dirección hacia ti, con una rapidez que probablemente sea más de 1000 km/h (la rapidez exacta depende de la latitud a la que te encuentres). Cuando te paras frente a ese muro estás siendo arrastrado a la misma rapidez, y por ello no lo notas. Pero cuando saltas hacia arriba, cuando tus pies ya no están en contacto con el piso, ¿por qué la pared no te golpea con gran rapidez?
47. En la escuela un niño aprende que la Tierra viaja a más de 100,000 kilómetros por hora en torno al Sol, y con miedo pregunta por qué no hemos sido barridos. ¿Cuál es tu explicación?
48. Si lanzas una moneda hacia arriba estando dentro de un tren en movimiento, ¿dónde cae cuando el movimiento del tren es uniforme en línea recta? ¿Y cuando el tren desacelera mientras la moneda está en el aire? ¿Y cuando el tren está tomando una curva?
49. La chimenea de un tren de juguete estacionario es un cañón de resorte vertical que dispara un balón de acero a una altura aproximada de un metro, directamente hacia arriba, tan recto que el balón siempre regresa a la chimenea. Supón que el tren se mueve a rapidez constante por un tramo recto de vía. ¿Crees que el balón seguirá regresando a la chimenea si es disparado desde el tren en movimiento? ¿Y si el tren acelera por el tramo recto? ¿Y si recorre una vía circular a rapidez constante? ¿Por qué son distintas tus respuestas?
50. Piensa en el avión que se vuela directamente hacia el este en un tramo, y luego regresa volando directamente hacia el oeste. Al volar en una dirección, sigue la rotación de la Tierra; y cuando viaja en la dirección contraria, va en contra de la rotación de la Tierra. Sin embargo, cuando no hay viento, los tiempos de vuelo son iguales en cualquier dirección. ¿Por qué?



Chelcie Liu pide a los estudiantes que consulten con sus compañeros y predigan qué bola llegará primero al final de las pistas, que tienen la misma longitud.

Hace más de 2,000 años, los antiguos científicos griegos estaban familiarizados con algunas de las ideas de la física que estudiamos en la actualidad. Entendían bien algunas propiedades de la luz, pero se confundían en lo relativo al movimiento. Con Galileo y su estudio de las esferas sobre planos inclinados, se alcanzó un gran progreso respecto a la comprensión del movimiento, como vimos en el capítulo anterior. En este capítulo aprenderemos las reglas del movimiento que abarcan tres conceptos: *rapidez*, *velocidad* y *aceleración*. Sería bueno dominar estos conceptos, pero bastará con que te familiarices con ellos y puedas distinguirlos entre sí. En los siguientes capítulos te habitarás más a ellos. Aquí sólo estudiaremos la forma más sencilla del movimiento: la que va a lo largo de una trayectoria en línea recta, es decir, el *movimiento rectilíneo*.

El movimiento es relativo

Todo se mueve, hasta lo que parecería estar en reposo. Todo se mueve en relación con el Sol y las estrellas. Mientras estás leyendo este libro, te mueves a unos 107,000 kilómetros por hora en relación con el Sol, y te mueves aún más rápido con respecto al centro de nuestra galaxia. Cuando examinamos el movimiento de algo, lo que describimos es el movimiento en relación con algo más. Si caminas por el pasillo de un autobús en movimiento, es probable que tu rapidez con respecto al piso del vehículo sea bastante distinta de tu rapidez con respecto al camino. Cuando se dice que un auto de carreras alcanza una rapidez de 300 kilómetros por hora, queremos decir que es con respecto a la pista de competencias. A menos que indiquemos otra cuestión, al describir la rapidez de cosas de nuestro entorno, lo haremos en relación con la superficie terrestre. El movimiento es relativo.

Rapidez



Definición de rapidez
Rapidez media

Antes de Galileo, la gente describía los objetos en movimiento simplemente como “lentos” o “rápidos”; no obstante, tales descripciones eran muy vagas. A Galileo se le da el crédito de ser primero en medir la rapidez al considerar la distancia que se cubre durante cierto tiempo. Definió la **rapidez** como la distancia recorrida por unidad de tiempo.

$$\text{Rapidez} = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}}$$



FIGURA 3.1

Cuando estás sentado en una silla, tu rapidez es cero con respecto a la Tierra; pero 30 km/s respecto al Sol.

TABLA 3.1

Rapideces aproximadas en distintas unidades

12 mi/h	=	20 km/h	=	6 m/s
25 mi/h	=	40 km/h	=	11 m/s
37 mi/h	=	60 km/h	=	17 m/s
50 mi/h	=	80 km/h	=	22 m/s
62 mi/h	=	100 km/h	=	28 m/s
75 mi/h	=	120 km/h	=	33 m/s
100 mi/h	=	160 km/h	=	44 m/s



FIGURA 3.2

Este velocímetro da lecturas en millas por hora y en kilómetros por hora.

Un ciclista que recorre 30 metros en un tiempo de 2 segundos, por ejemplo, tiene una rapidez de 15 metros por segundo.

Cualquier combinación de unidades de distancia entre tiempo es válida para medir la rapidez: para los vehículos de motor (o en distancias largas) por lo común se utilizan las unidades de kilómetros por hora (km/h) o millas por hora (mi/h, o mph). Para distancias más cortas con frecuencia se usan las unidades de metros por segundo (m/s). El símbolo diagonal (/) se lee *por*, y quiere decir “dividido entre”. En este libro usaremos principalmente metros por segundo. La tabla 3.1 muestra la comparación de rapidezces, en distintas unidades.¹

Rapidez instantánea

Las cosas que se mueven a menudo tienen variaciones en la rapidez. Un automóvil, por ejemplo, puede recorrer una calle a 50 km/h, detenerse hasta 0 km/h con la luz roja del semáforo, y acelerar sólo hasta 30 km/h debido al tránsito vehicular. Puedes saber en cada instante la rapidez del automóvil observando el velocímetro. La rapidez en cualquier instante es la *rapidez instantánea*. En general, cuando un automóvil viaja a 50 km/h, sostiene esa rapidez durante menos de una hora. Si lo hiciera durante toda una hora, recorrería los 50 km. Si durara media hora a esa velocidad, recorrería la mitad de esa distancia, es decir, 25 km. Si sólo durara 1 minuto, recorrería menos de 1 km.

Rapidez media

Cuando se planea hacer un viaje en automóvil, el conductor desea saber el tiempo de recorrido. Lo que considera es la *rapidez promedio* o *rapidez media*, en el viaje. La rapidez media se define como:

$$\text{Rapidez media} = \frac{\text{distancia total recorrida}}{\text{tiempo de recorrido}}$$

La rapidez media se calcula con mucha facilidad. Por ejemplo, si recorremos 80 kilómetros de distancia en un tiempo de 1 hora, decimos que nuestra rapidez media fue de 80 kilómetros por hora. Asimismo, si recorriéramos 320 kilómetros en 4 horas,

$$\text{Rapidez media} = \frac{\text{distancia total recorrida}}{\text{tiempo de recorrido}} = \frac{320 \text{ km}}{4 \text{ h}} = 80 \text{ km/h}$$

Vemos que cuando una distancia en kilómetros (km) se divide entre un tiempo en horas (h), el resultado está en kilómetros por hora (km/h).

Como la rapidez media es la distancia total recorrida dividida entre el tiempo total del recorrido, no indica las diversas rapidezces ni sus posibles variaciones durante intervalos de tiempo más cortos. En la mayoría de nuestros viajes avanzamos con varias rapidezces, de manera que la rapidez media es muy distinta de la rapidez instantánea.

Si conocemos la rapidez media y el tiempo de recorrido, es fácil determinar la distancia recorrida. Si la definición anterior se ordena de forma sencilla, se obtiene

$$\text{Distancia total recorrida} = \text{rapidez media} \times \text{tiempo}$$

¹La conversión se basa en 1 h = 3600 s y 1 mi = 1609.344 m.



Si te infraccionan por exceso de velocidad, ¿fue por tu *rapidez instantánea* o por tu *rapidez media*?

¡EUREKA!

Si tu rapidez media es 80 kilómetros por hora durante un viaje de 4 horas, por ejemplo, recorres una distancia total de 320 kilómetros.

EXAMÍNA TE

1. ¿Cuál es la rapidez media de un guepardo que recorre 100 metros en 4 segundos? ¿Y si recorre 50 m en 2 s?
2. Si un automóvil se mueve con una rapidez media de 60 km/h durante una hora, recorre una distancia de 60 km.
 - a. ¿Cuánto hubiera recorrido si se moviera con esa rapidez durante 4 h?
 - b. ¿Y durante 10 h?
3. Además del velocímetro en el tablero de instrumentos, en los automóviles se instala un odómetro, que indica la distancia recorrida. Si se ajusta la distancia inicial a cero, al principio de un viaje, y media hora después indica 40 km, ¿cuál fue la rapidez media?
4. ¿Sería posible alcanzar esta rapidez media sin exceder la rapidez de 80 km/h?

Velocidad



Velocidad
Velocidad variable

Cuando se conocen tanto la rapidez como la dirección de un objeto, estamos especificando su **velocidad**. Cuando decimos que un automóvil viaja a 60 km/h, por ejemplo, nos referimos a su rapidez. Pero si señalamos que se mueve 60 km/h al norte especificamos su **velocidad**. La rapidez es una descripción de qué tan rápido se mueve; mientras que la velocidad indica qué tan rápido se mueve y en qué dirección. A una cantidad como la velocidad, que especifica tanto dirección como magnitud se le denomina **cantidad vectorial**. Recuerda del capítulo 2 que la fuerza es una cantidad vectorial, la cual para describirse requiere tanto magnitud

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

(¿Estás leyendo esto antes de haber razonado las respuestas? Como dijimos en el capítulo anterior, cuando encuentres las preguntas Examínate que hay en este libro, detente y **piensa** antes de leer las respuestas que vienen adelante. No sólo aprenderás más, sino que disfrutarás del mayor aprendizaje.)

1. En ambos casos, la respuesta es 25 m/s:

$$\text{Rapidez promedio} = \frac{\text{distancia recorrida}}{\text{intervalo de tiempo}} = \frac{100 \text{ metros}}{4 \text{ segundos}} = \frac{50 \text{ metros}}{2 \text{ segundos}} = 25 \text{ m/s}$$

2. La distancia recorrida es la rapidez media $\times$ tiempo del viaje, de manera que

$$\text{a. Distancia} = 60 \text{ km/h} \times 4 \text{ h} = 240 \text{ km.}$$

$$\text{b. Distancia} = 60 \text{ km/h} \times 10 \text{ h} = 600 \text{ km.}$$

$$\text{3. Rapidez media} = \frac{\text{distancia total recorrida}}{\text{intervalo de tiempo}} = \frac{40 \text{ km}}{0.5 \text{ h}} = 80 \text{ km/h.}$$

4. No, si el viaje parte del reposo y termina en el reposo. Hay veces que las rapidez instantáneas son menores que 80 km/h, por lo que el conductor debe manejar, por momentos, con rapidez mayor que 80 km/h para obtener un promedio de 80 km/h. En la práctica las rapidez medias suelen ser mucho menores que las máximas rapidez instantáneas.

como dirección. Asimismo, la velocidad es una cantidad vectorial. En cambio, las cantidades que se describen sólo con magnitud se denominan *cantidades escalares*. La rapidez es una cantidad escalar.

Velocidad constante

La rapidez constante no varía. Algo con rapidez constante ni disminuye ni aumenta su rapidez. Por otro lado, la velocidad constante implica *tanto* rapidez constante *como* dirección constante. Esta última es una recta: la trayectoria del objeto no describe una curva. Por consiguiente, velocidad constante significa movimiento en una recta a rapidez constante.

Velocidad variable

Si la rapidez o la dirección cambian (o si ambas lo hacen), entonces cambia la velocidad. Por ejemplo, un automóvil que describe un círculo tiene rapidez constante, pero como su dirección cambia, su velocidad no es constante. Estudiaremos esto en la siguiente sección cuando veamos la *aceleración*.



FIGURA 3.3

El automóvil en la trayectoria circular puede tener una rapidez constante, pero su velocidad cambia a cada instante. ¿Por qué?

EXAMÍNATE

1. "Una persona se mueve con una rapidez constante en una dirección constante." Di lo mismo con menos palabras.
2. El velocímetro de un automóvil que va hacia el este indica 100 km/h. Se cruza con otro que va hacia el oeste a 100 km/h. ¿Los dos vehículos tienen la misma rapidez? ¿Tienen la misma velocidad?
3. Durante cierto intervalo de tiempo, el velocímetro de un automóvil marca 60 km/h constantes. ¿Esto equivale a una rapidez constante? ¿Y a una velocidad constante?

Aceleración



Definición de aceleración
Ejemplo numérico
de aceleración

Podemos cambiar la velocidad de algo al modificar su rapidez, su dirección o *ambas*. El qué tan rápido cambia la velocidad es lo que entendemos por **aceleración**:

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

Decimos que un cuerpo tiene aceleración cuando hay un *cambio* en su estado de movimiento. Estamos familiarizados con la aceleración de un automóvil.

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. "Una persona se mueve con velocidad constante."
2. Ambos vehículos tienen la misma rapidez; pero sus velocidades son contrarias porque se mueven en direcciones contrarias.
3. La lectura constante del velocímetro indica que la rapidez es constante, aunque la velocidad quizá no sea constante ya que el vehículo podría no estarse moviendo en una trayectoria rectilínea, en cuyo caso estaría acelerando.



FIGURA 3.4

Decimos que un cuerpo tiene aceleración cuando hay un *cambio* en su estado de movimiento.

Cuando el conductor pisa el acelerador, los pasajeros experimentamos aceleración conforme nos recargamos más contra los asientos. La idea clave que define la aceleración es el *cambio*. Supongamos que al manejar aumentamos, en un segundo, nuestra velocidad de 30 a 35 kilómetros por hora, y en el siguiente segundo a 40 kilómetros por hora, y a 45 en el siguiente y así sucesivamente. Cambiamos la velocidad en 5 kilómetros por hora cada segundo. Este cambio de velocidad es lo que entendemos por aceleración.

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{intervalo de tiempo}} = \frac{5 \text{ km/h}}{1 \text{ s}} = 5 \text{ km/h}\cdot\text{s}$$

En este caso, la aceleración es 5 kilómetros por hora por segundo (y se escribe $5 \text{ km/h}\cdot\text{s}$). Observa que entran dos veces unidades de tiempo: una por la unidad de velocidad, y de nuevo por el intervalo de tiempo en que cambió la velocidad. Nota también que la aceleración no es tan sólo el cambio total de la velocidad: es la *razón de cambio* de la velocidad con respecto al tiempo, o el *cambio de velocidad por segundo*.

EXAMÍNA TE

1. Un automóvil puede pasar del reposo a 90 km/h en 10 s. ¿Cuál es su aceleración?
2. En 2.5 s, un automóvil aumenta su rapidez de 60 a 65 km/h, mientras que una bicicleta pasa del reposo a 5 km/h. ¿Cuál de los dos tiene la mayor aceleración? ¿Cuál es la aceleración de cada uno?

El término *aceleración* se aplica tanto a disminuciones como a incrementos de la velocidad. Por ejemplo, decimos que los frenos de un automóvil producen grandes desaceleraciones, es decir, que hay una gran disminución de la velocidad del vehículo en un segundo. Con frecuencia se llama a esto *desaceleración*. Sentimos la desaceleración cuando el conductor de un autobús aplica los frenos y nos sentimos impulsados hacia adelante del vehículo.

Aceleramos siempre que nos movemos en trayectorias curvas, aun cuando nos movamos a rapidez constante, ya que nuestra dirección cambia y, por consiguiente, también cambia nuestra velocidad. Sentimos esta aceleración cuando algo nos impulsa hacia el exterior de la curva.

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Su aceleración es $9 \text{ km/h}\cdot\text{s}$. Específicamente hablando, sería su aceleración media, porque habría cierta variación en esta tasa de aumento de rapidez.
2. Las aceleraciones del automóvil y de la bicicleta son iguales: $2 \text{ km/h}\cdot\text{s}$.

$$\text{Aceleración}_{\text{coche}} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{intervalo de tiempo}} = \frac{65 \text{ km/h} - 60 \text{ km/h}}{2.5 \text{ s}} = \frac{5 \text{ km/h}}{2.5 \text{ s}} = 2 \text{ km/h}\cdot\text{s}$$

$$\text{Aceleración}_{\text{bici}} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{intervalo de tiempo}} = \frac{5 \text{ km/h} - 0 \text{ km/h}}{2.5 \text{ s}} = \frac{5 \text{ km/h}}{2.5 \text{ s}} = 2 \text{ km/h}\cdot\text{s}$$

Aunque tales velocidades son muy distintas, la razón de cambio de la velocidad es la misma. Por lo tanto, las aceleraciones son iguales.

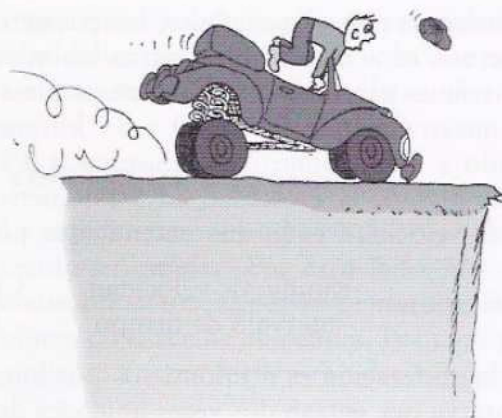


FIGURA 3.5

El conductor siente una rápida desaceleración, al ser impulsado hacia adelante (de acuerdo con la primera ley de Newton).



Hay tres dispositivos que cambian la velocidad en un automóvil: el acelerador, los frenos y el volante.

¡EUREKA!

Por este motivo distinguimos entre rapidez y velocidad, y definimos la *aceleración* como la razón con la que cambia la velocidad en el tiempo, y con ello abarcamos los cambios tanto en la rapidez como en la dirección.

Quien ha estado de pie en un autobús lleno de pasajeros ha sentido la diferencia entre la velocidad y la aceleración. A excepción de los saltos en un camino irregular, tú puedes estar de pie, sin esfuerzos adicionales, dentro de un autobús que se mueva a velocidad constante, independientemente de lo rápido que vaya. Puedes lanzar una moneda hacia arriba y atraparla exactamente del mismo modo que si el vehículo estuviera parado. Sólo cuando el autobús acelera, sea que aumente o disminuya su rapidez, o que tome una curva, es cuando tienes algunas dificultades.

En gran parte de este libro sólo nos ocuparemos de los movimientos a lo largo de una línea recta. Cuando se describe el movimiento rectilíneo, se acostumbra usar los términos *rapidez* y *velocidad* en forma indistinta. Cuando no cambia la dirección, la aceleración se puede expresar como la razón de cambio de la *rapidez* en el tiempo.

$$\text{Aceleración (en una recta)} = \frac{\text{cambio en la rapidez}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

EXAMÍNA TE

1. ¿Cuál es la aceleración de un automóvil de carreras que pasa zumbando junto a ti con velocidad constante de 400 km/h?
2. ¿Qué tiene mayor aceleración, un avión que pasa de 1,000 a 1,005 km/h en 10 segundos, o una patineta que pasa de 0 a 5 km/h en 1 segundo?

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Cero, porque su velocidad no cambia.
2. Los dos aumentan su rapidez en 5 km/h, pero la patineta lo hace en la décima parte del tiempo. Por consiguiente, la patineta tiene la mayor aceleración, 10 veces mayor. Con algunos cálculos se demuestra que la aceleración del avión es 0.5 km/h·s; mientras que la de la patineta, que es más lenta, es 5 km/h·s. La velocidad y la aceleración son conceptos muy diferentes. Es muy importante diferenciarlos.

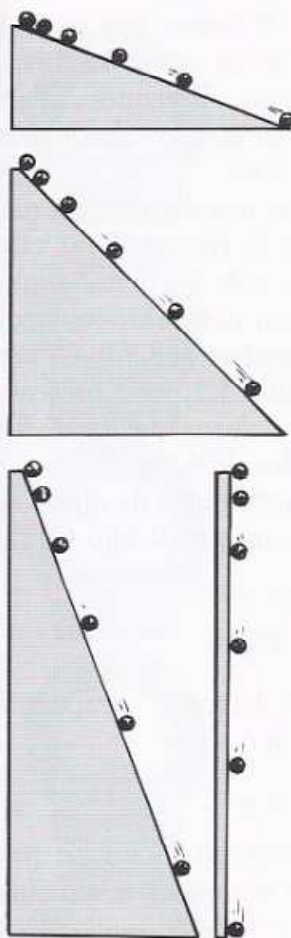


FIGURA 3.6

Figura interactiva

Cuanto mayor sea la inclinación del plano, la aceleración de la esfera será mayor. ¿Cuál es la aceleración en el plano vertical?

La aceleración en los planos inclinados de Galileo

Galileo desarrolló el concepto de aceleración con sus experimentos en planos inclinados. Su principal interés era el de la caída de los objetos, y como carecía de los cronómetros adecuados, usó planos inclinados para disminuir el movimiento acelerado e investigarlo más cuidadosamente.

Encontró que una esfera que rueda bajando por un plano inclinado aumenta en la misma cantidad su rapidez en los segundos sucesivos, es decir, rueda sin cambiar su aceleración. Por ejemplo, veríamos que una esfera que rueda por un plano con cierto ángulo de inclinación aumenta su rapidez en 2 metros por segundo cada segundo que rueda. Este incremento por segundo es su aceleración. Su rapidez instantánea a intervalos de 1 segundo, con esta aceleración, será entonces 0, 2, 4, 6, 8, 10, etcétera, metros por segundo. Observamos que la rapidez o velocidad instantánea de la esfera, en cualquier tiempo después de haber sido soltada desde el reposo, es simplemente su aceleración multiplicada por ese tiempo:²

$$\text{Velocidad adquirida} = \text{aceleración} \times \text{tiempo}$$

Si sustituimos la aceleración de la esfera en esta ecuación (dos metros por segundo al cuadrado), podemos ver que al final de 1 segundo viaja a 2 metros por segundo; al final de 2 segundos viaja a 4 metros por segundo; al final de 10 segundos se mueve a 20 metros por segundo; y así sucesivamente. La rapidez o velocidad instantánea en cualquier momento no es más que la aceleración multiplicada por la cantidad de segundos que ha estado acelerando.

Galileo encontró que mayores inclinaciones generan mayores aceleraciones. Cuando el plano es vertical, la esfera alcanza su aceleración máxima. Entonces la aceleración es igual a la de un objeto que cae (figura 3.6). Independientemente del peso o del tamaño del objeto, Galileo descubrió que cuando la resistencia del aire es lo suficientemente pequeña como para no ser tomada en cuenta, todos los objetos caen con la misma aceleración, la que es invariable.

Caída libre



¿Qué tan rápido?
Caída libre: ¿Qué tan rápido?

Qué tan rápido

Los objetos caen a causa de la fuerza de gravedad. Cuando un objeto que cae está libre de toda restricción —sin fricción de aire ni de cualquier otro tipo—, y cae bajo la sola influencia de la gravedad, ese objeto se encuentra en **caída libre**. (En el capítulo 4 describiremos los efectos de la resistencia del aire sobre la caída de objetos.) La tabla 3.2 muestra la rapidez instantánea de un objeto en caída libre a intervalos de 1 segundo. Lo importante que se nota en esos números es la forma en que cambia la rapidez. *Durante cada segundo de caída el objeto aumenta su velocidad en 10 metros por segundo.* Esta ganancia por segundo es la aceleración.

² Observe que esta relación se deriva de la definición de la aceleración. Se parte de $a = v/t$ (y si se multiplican por t ambos lados de la ecuación) el resultado es $v = at$.

TABLA 3.2
Caída libre desde el reposo

Tiempo de caída (segundos)	Velocidad adquirida (metro/segundo)
0	0
1	10
2	20
3	30
4	40
5	50
·	·
·	·
·	·
t	$10t$

La aceleración de la caída libre es aproximadamente de 10 metros por segundo cada segundo o, en notación compacta, es 10 m/s^2 (que se lee como 10 metros por segundo al cuadrado). Observa que la unidad de tiempo, el segundo, aparece dos veces: una por ser la unidad de rapidez, y otra por ser el intervalo de tiempo durante el cual cambia la rapidez.

En el caso de los objetos en caída libre se acostumbra el uso de la letra g para representar la aceleración (ya que la aceleración se debe a la *gravedad*). El valor de g es muy distinto en la superficie lunar o en la superficie de los demás planetas. Aquí en la Tierra g varía muy poco en distintos lugares, y su valor promedio es 9.8 metros por segundo cada segundo o, en notación compacta, 9.8 m/s^2 . Esto lo redondeamos a 10 m/s^2 en esta explicación y en la tabla 3.2, para presentar las ideas con mayor claridad. Los múltiplos de 10 son más claros que los de 9.8. Cuando la exactitud sea importante, se deberá usar el valor de 9.8 m/s^2 .

Observa que en la tabla 3.2 la rapidez o velocidad instantánea de un objeto que cae partiendo del reposo es consistente con la ecuación que dedujo Galileo usando sus planos inclinados:

$$\text{Velocidad adquirida} = \text{aceleración} \times \text{tiempo}$$

La velocidad instantánea v de un objeto que cae desde el reposo³ después de un tiempo t se puede expresar en notación compacta como sigue:

$$v = gt$$

Para cerciorarte de que esta ecuación tiene sentido, toma un momento para comprobarla en la tabla 3.2. Observa que la velocidad o rapidez instantánea en metros por segundo no es más que la aceleración $g = 10 \text{ m/s}^2$ multiplicada por el tiempo t en segundos.

La aceleración de la caída libre es más clara si pensamos en un objeto que cae equipado con un velocímetro (figura 3.7). Supongamos que una piedra se deja caer por un acantilado muy alto, y que tú la observas con un telescopio. Si enfocas tu telescopio en el velocímetro, notarías un incremento en su rapidez conforme el tiempo pasa. ¿De cuánto? La respuesta es en 10 m/s cada segundo sucesivo.

EXAMÍNAME

En la figura 3.7, ¿qué indicaría el velocímetro de la piedra que cae 5 s después de partir del reposo? ¿Y 6 s después de dejarla caer? ¿Y a los 6.5 s?

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

Las lecturas del velocímetro serían 50 m/s, 60 m/s y 65 m/s, respectivamente. Lo puedes deducir de la tabla 3.2, o usar la ecuación $v = gt$, donde g es 10 m/s^2 .

³Si en vez de dejarse caer desde el reposo, el objeto se lanza hacia abajo con una rapidez v_0 , la rapidez v después de cualquier tiempo real t es $v = v_0 + gt$. No nos complicaremos con esto aquí; más bien, aprenderemos tanto como podamos de situaciones más sencillas. ¡Lo cual será fantástico!

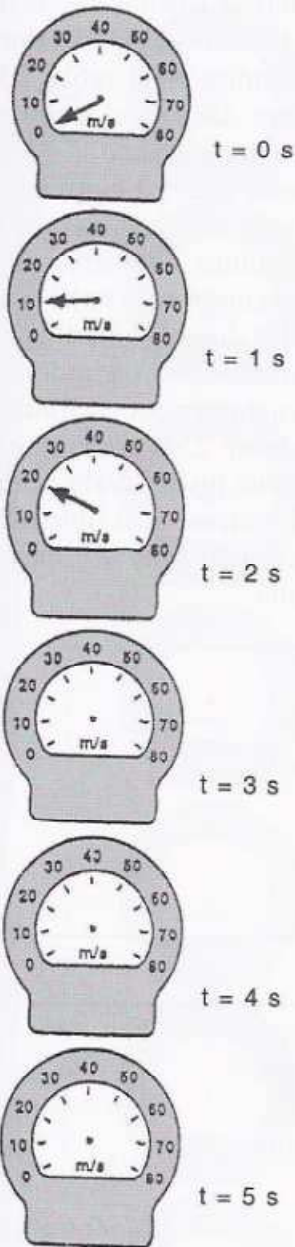


FIGURA 3.7

Figura interactiva

Imagínate que la piedra que cae tiene un velocímetro. En cada segundo sucesivo de su caída verías que la rapidez de esa piedra aumenta la misma cantidad: 10 m/s. Dibuja la aguja de cada velocímetro cuando $t = 3 \text{ s}$, 4 s y 5 s . (La tabla 3.2 muestra las rapidezces que indicaría en los distintos segundos de caída.)

Hasta aquí hemos considerado objetos que se mueven directo hacia abajo, en dirección de la gravedad. ¿Y si se avienta un objeto directo hacia arriba? Una vez lanzado continúa moviéndose hacia arriba durante algún tiempo, y después regresa. En su punto más alto, al cambiar su dirección de movimiento de hacia arriba a hacia abajo, su rapidez instantánea es cero. A continuación comienza a ir hacia abajo *exactamente como si se hubiera dejado caer desde el reposo a esa altura*.

Durante la parte de subida de este movimiento el objeto se desacelera al subir. No debe sorprendernos que desacelere a razón de 10 metros por segundo cada segundo: la misma aceleración que toma cuando va hacia abajo. Así, como muestra la figura 3.8, la rapidez instantánea en puntos de igual altura en la trayectoria es igual, ya sea que el objeto se mueva hacia arriba o hacia abajo. Desde luego, las velocidades son opuestas, ya que tienen direcciones contrarias. Observa que las velocidades hacia abajo tienen signo negativo para indicar que la dirección es hacia abajo (se acostumbra a llamar positivo *a hacia arriba*, y negativo *a hacia abajo*). Ya sea que se mueva hacia arriba o hacia abajo, la aceleración es 10 m/s^2 hacia abajo todo el tiempo.

EXAMÍNAME

Arrojas una pelota directamente hacia arriba que sale de tu mano a 20 m/s. ¿Qué predicciones puedes hacer acerca de esa pelota? (¡Razona tu respuesta *antes* de leer las predicciones sugeridas!)

Hasta dónde

Hasta dónde cae un objeto es muy distinto de *qué tan rápido* cae. Con sus planos inclinados, Galileo determinó que la distancia que recorre un objeto que acelera uniformemente es proporcional al *cuadrado del tiempo*. Los detalles de esta relación están en el apéndice B. Aquí sólo reseñaremos los resultados. La distancia recorrida por un objeto uniformemente acelerado que parte del reposo es

$$\text{Distancia recorrida} = 1/2 (\text{aceleración} \times \text{tiempo} \times \text{tiempo})$$

Esta relación aplica a la distancia de algo que cae. La podemos expresar para el caso de un objeto en caída libre, en notación compacta, como sigue:

$$d = 1/2 gt^2$$

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

Hay varias. Una es que se desacelerará a 10 m/s un segundo después de haber salido de tu mano, que se detendrá en forma momentánea 2 segundos después de dejar tu mano, cuando llega a la cúspide de su trayectoria. Esto se debe a que pierde 10 m/s cada segundo que sube. Otra predicción es que 1 segundo después, a los 3 segundos en total, se estará moviendo hacia abajo a 10 m/s. En otro segundo más habrá regresado a su punto de partida, moviéndose a 20 m/s. Entonces, el tiempo en cada dirección es 2 segundos, y el tiempo total en el aire es 4 segundos. Más adelante veremos hasta dónde llega en la subida y en la bajada.

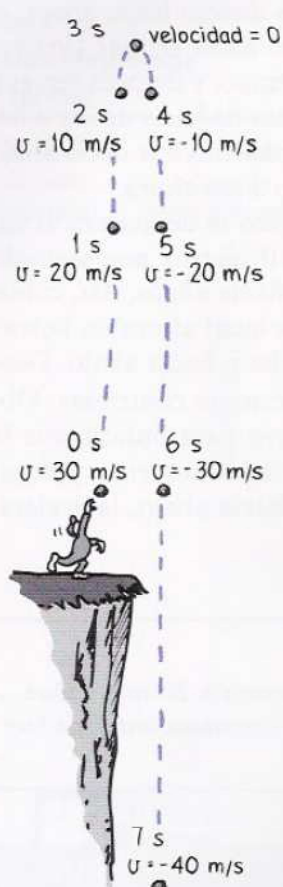


FIGURA 3.8

Figura interactiva

La razón de cambio de la velocidad cada segundo es la misma.

TABLA 3.3
Distancia recorrida en la caída libre

Tiempo de caída (segundos)	Distancia recorrida (metros)
0	0
1	5
2	20
3	45
4	80
5	125
.	.
.	.
.	.
t	$\frac{1}{2}10 t^2$

donde d es la distancia recorrida de algo que cae cuando se sustituye el tiempo de su caída, en segundos, por t al cuadrado.⁴ Si se usa 10 m/s^2 como el valor de g , la distancia recorrida en diversos tiempos de caída se indica en la tabla 3.3.

Vemos que un objeto cae tan sólo 5 metros de altura durante el primer segundo de la caída, mientras que su rapidez es 10 metros por segundo. Esto puede confundirnos, ya que se pensaría que el objeto debería caer 10 metros. Pero para que lo hiciera en el primer segundo de la caída debería caer con una rapidez promedio de 10 metros por segundo durante todo el segundo. Comienza a caer a 0 metros por segundo, y su rapidez es 10 metros por segundo sólo en el último instante del intervalo de 1 segundo. Su rapidez promedio durante este intervalo es el promedio de sus rapidez inicial y final, 0 y 10 metros por segundo. Para calcular el valor promedio de estos dos números, o de cualquier par de números, simplemente se suman los dos y el resultado se divide entre 2. De este modo se obtienen 5 metros por segundo en nuestro caso, que durante un intervalo de tiempo de 1 segundo da como resultado una distancia de 5 metros. Si el objeto continúa cayendo en los siguientes segundos lo hará recorriendo cada vez mayores distancias, porque su rapidez aumenta en forma continua.

EXAMÍNATE

Un gato baja de una cornisa y llega al suelo en $1/2$ segundo.

- ¿Cuál es su rapidez al llegar al suelo?
- ¿Cuál es su rapidez media durante el $1/2$ segundo?
- ¿Qué altura tiene la cornisa desde el piso?

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

- Rapidez: $v = gt = 10 \text{ m/s}^2 \times 1/2 \text{ s} = 5 \text{ m/s}$.
- Rapidez media: $\bar{v} = \frac{v \text{ inicial} + v \text{ final}}{2} = \frac{0 \text{ m/s} + 5 \text{ m/s}}{2} = 2.5 \text{ m/s}$.

Hemos puesto una raya arriba del símbolo para indicar que es la rapidez media: $\bar{v}$.

- Distancia: $d = vt = 2.5 \text{ m/s} \times 1/2 \text{ s} = 1.25 \text{ m}$.

O también,

$$d = 1/2 gt^2 = 1/2 \times 10 \text{ m/s}^2 = (1/2 \text{ s})^2 = 1/2 \times 10 \text{ m/s}^2 \times 1/4 \text{ s}^2 = 1.25 \text{ m}$$

Observa que se puede calcular la distancia por cualquiera de estas dos ecuaciones, ya que son equivalentes.

⁴ $d = \text{velocidad media} \times \text{tiempo}$

$$d = \frac{\text{velocidad inicial} + \text{velocidad final}}{2} \times \text{tiempo}$$

$$d = \frac{0 + gt}{2} \times t$$

$$d = 1/2 gt^2$$

(Véase el apéndice B para una aplicación adicional.)

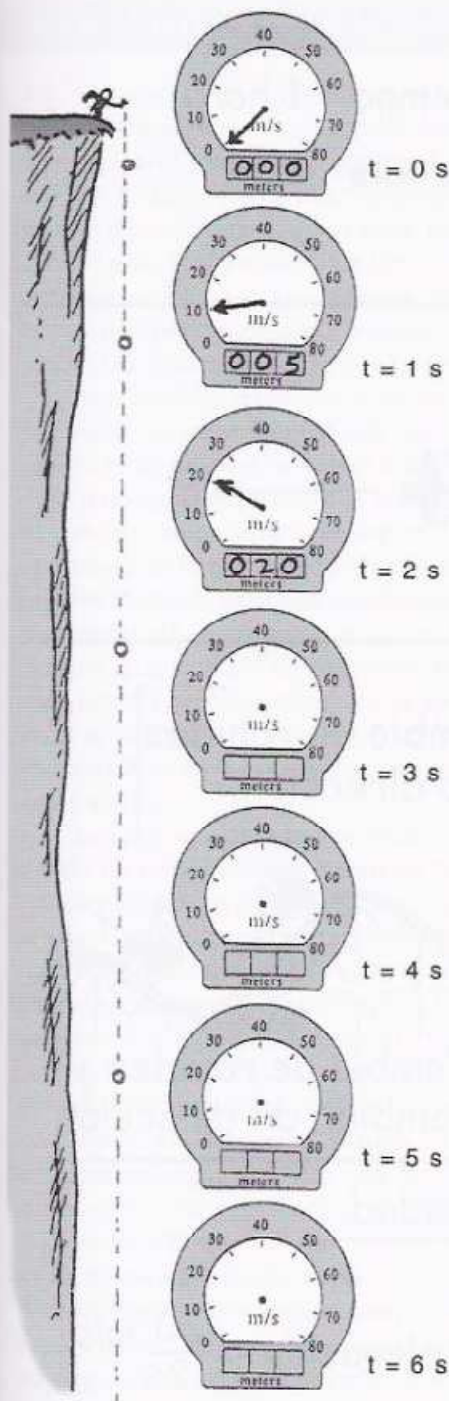


FIGURA 3.9

Imagínate que una piedra que cae tuviera un velocímetro y un odómetro. Las indicaciones de velocidad aumentan en 10 m/s y las de distancias en $\frac{1}{2}gt^2$. ¿Puedes anotar las posiciones de aguja del velocímetro y las distancias del odómetro?

Lo común es observar que muchos objetos caen con aceleraciones distintas. Una hoja de árbol, una pluma o una hoja de papel pueden llegar al suelo con lentitud, con una especie de bamboleo. El hecho de que la resistencia del aire sea la causa de esas aceleraciones distintas se puede demostrar muy bien con un tubo de vidrio hermético que contenga objetos livianos y pesados, por ejemplo, una pluma y una moneda. En presencia del aire, ambas caen con aceleraciones muy distintas. No obstante, si con una bomba de vacío se saca el aire del tubo, al invertirlo rápidamente se ve que la pluma y la moneda caen con la misma aceleración (figura 3.10). Aunque la resistencia del aire altera mucho el movimiento de objetos como plumas que caen, el movimiento de los objetos más pesados, como piedras y bolas de béisbol, en las valores bajos de rapidez no se ve afectado en forma apreciable por el aire. Se pueden usar las ecuaciones $v = gt$ y $d = \frac{1}{2}gt^2$ con mucha aproximación con la mayoría de los objetos que caen por el aire desde el reposo.



FIGURA 3.10

En el vacío una pluma y una moneda caen con aceleraciones iguales.

“Qué tan rápido” cambia de rapidez

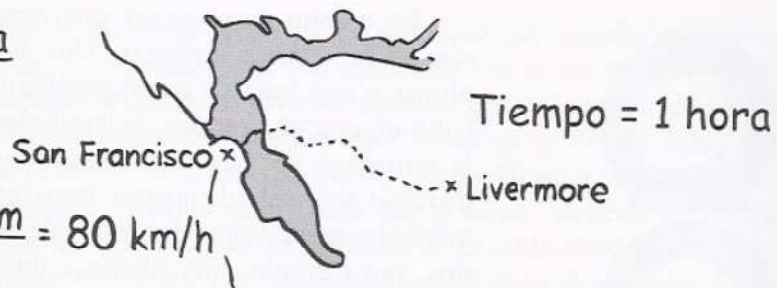
En el análisis del movimiento de objetos que caen surgen dificultades ya que es probable que se confundan “qué tan rápido” y “hasta dónde”. Cuando queremos especificar qué tan rápido está cayendo algo, nos referimos a *rapidez* o a *velocidad*, que se expresan como $v = gt$. Cuando buscamos determinar desde qué altura cae algo, nos referimos a *distancia*, la cual se expresa como $d = \frac{1}{2}gt^2$. Rapidez o velocidad (qué tan rápido) y distancia (hasta dónde) son muy diferentes entre sí.

Un concepto que confunde mucho y que quizá sea el más difícil que se encuentre en este libro es “qué tan rápido cambia de rapidez, que es la aceleración. Lo que hace tan complicada a la aceleración es que es una *razón de cambio de una razón de cambio*. Con frecuencia se confunde con la velocidad, que es en sí una razón de cambio (la razón de cambio de la posición). La aceleración no es velocidad, ni siquiera es un cambio de velocidad. La aceleración es la razón de cambio con la que cambia la velocidad misma.

Recuerda que los seres humanos tardaron casi 2,000 años, desde la época de Aristóteles, en tener una noción clara del movimiento; en consecuencia, ¡ten paciencia contigo mismo si ves que necesitas algunas horas para entenderlo!

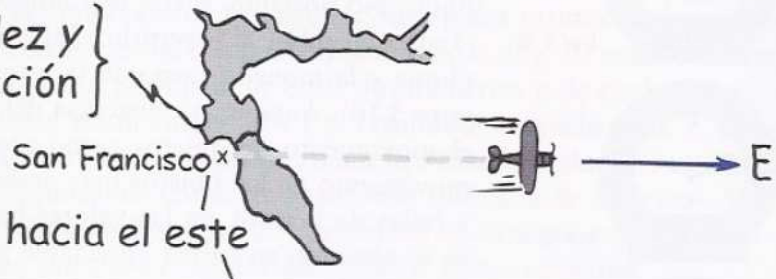
$$\text{Rapidez} = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}}$$

$$\text{Rapidez} = \frac{80 \text{ km}}{1 \text{ h}} = 80 \text{ km/h}$$



$$\text{Velocidad} = \left\{ \begin{array}{l} \text{rapidez y} \\ \text{dirección} \end{array} \right\}$$

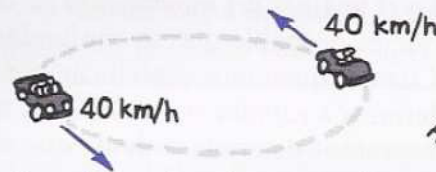
$$\text{Velocidad} = 300 \text{ km/h, hacia el este}$$



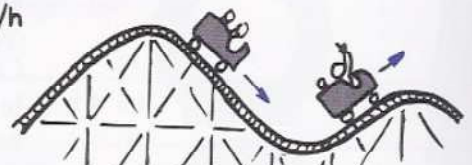
$$\text{Aceleración} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Razón de} \\ \text{cambio} \\ \text{de velocidad} \end{array} \right\} \text{ debida a } \left\{ \begin{array}{l} \text{cambio de rapidez} \\ \text{y/o dirección} \end{array} \right\}$$



Cambio de rapidez
pero *no* de dirección

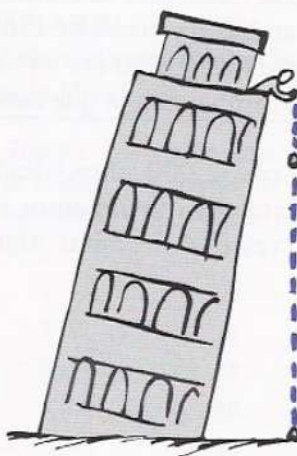


Cambio de dirección
pero *no* de rapidez



Cambio de rapidez y
también de dirección

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{tiempo}}$$



Tiempo = 0, velocidad = 0

Tiempo = 1 s, velocidad = 10 m/s

Tiempo = 2 s, velocidad = 20 m/s

$$\text{Aceleración} = \frac{20 \text{ m/s}}{2 \text{ s}}$$

$$a = 10 \frac{\text{m/s}}{\text{s}}$$

$$a = 10 \text{ m/ss}$$

$$a = 10 \text{ m/s}^2$$

FIGURA 3.11
Análisis del movimiento.

TIEMPO EN EL AIRE

Algunos atletas y bailarines tienen gran habilidad para saltar. Al saltar directamente hacia arriba parece que están “colgados en el aire” y desafían la gravedad. Pide a tus amigos que estimen el “tiempo en el aire” de los grandes saltadores, el tiempo durante el cual, quien salta, tiene los pies despegados del piso. Podrán decir que son 2 o 3 segundos. Pero ¡sucede que el tiempo en el aire de los más grandes saltadores es casi siempre menor que 1 segundo! Un tiempo mayor es una de las muchas ilusiones que tenemos en la naturaleza.

Una ilusión parecida es la altura vertical que un hombre puede alcanzar. Es probable que la mayoría de tus compañeros de clase no salten más que 0.5 metros. Podrán pasar por encima de una cerca de 0.5 metros, pero al hacerlo su cuerpo sube ligeramente. La altura de la barrera es distinta de la que sube el “centro de gravedad” de un saltarín. Muchas personas pueden saltar sobre una cerca de 1 metro de altura; aunque casi nadie sube 1 metro el “centro de gravedad” de su cuerpo. Incluso Michael Jordan, estrella del básquetbol, en su apogeo fue incapaz de subir su cuerpo 1.25 m; aunque con facilidad podía llegar bastante más arriba que la canasta, que está a más de 3 m sobre el piso.

La capacidad de salto se mide mejor estando parado y dando un brinco vertical. Párate de frente a un muro, con tus pies asentados en el piso y tus brazos extendidos hacia arriba. Haz una marca en la pared, donde apuntas tus dedos. A continuación salta y en lo más alto haz otra marca. La distancia entre ambas marcas es la medida de tu salto vertical. Si es más de 0.6 metros (2 pies), eres excepcional.

La física es la siguiente: al saltar hacia arriba, la fuerza del salto sólo se aplica mientras tus pies están en contacto con el piso. Cuanto mayor sea esa fuerza, mayor será tu rapidez de despegue y el salto será más alto. Cuando tus pies dejan el piso, de inmediato tu rapidez vertical hacia arriba disminuye, a la tasa constante de g : 10 m/s^2 . En lo más alto de tu salto tu rapidez hacia arriba disminuye a cero. A continuación comienzas a caer, y tu rapidez aumenta exactamente con la misma tasa, g . Si tocas tierra como despegaste, de pie y con las piernas extendidas, el tiempo de subida será igual al tiempo de caída; el tiempo en el aire es igual al tiempo de subida más el tiempo de bajada. Mientras estás en el aire ningún movimiento de agitar piernas ni brazos, ni de cualquier clase de movimiento del cuerpo, cambiará tu tiempo en el aire.

La relación entre el tiempo de subida o de bajada, y la altura vertical está dada por:

$$d = \frac{1}{2}gt^2$$

Si se conoce d , la altura vertical, esta ecuación se puede reordenar como sigue:

$$t = \sqrt{\frac{2d}{g}}$$

Spud Webb, la estrella del básquetbol estadounidense, alcanzó un salto vertical de pie de 1.25 m, en 1986.⁵ En ese momento fue el récord mundial. Usaremos la altura de su salto, 1.25 metros, como d y el valor más exacto de 9.8 m/s^2 como g . Al sustituir en la ecuación anterior, se obtiene t , la mitad del tiempo en el aire:

$$t = \sqrt{\frac{2d}{g}} = \sqrt{\frac{2(1.25 \text{ m})}{9.8 \text{ m/s}^2}} = 0.50 \text{ s}$$

Esto se multiplica por dos (por ser el tiempo de una dirección en un viaje redondo, de subida y de bajada), y vemos que el tiempo récord de Spud en el aire es 1 segundo.



Aquí hablamos de movimiento vertical. ¿Y los saltos con carrera? El tiempo en el aire sólo depende de la rapidez vertical del saltador al despegarse del suelo. Mientras está en el aire, su rapidez horizontal permanece constante, mientras que la vertical tiene aceleración. ¡Es interesante la física!

⁵ El valor de $d = 1.25 \text{ m}$ representa la altura máxima que sube el centro de gravedad del saltador, y no la altura de la barra. La altura que sube el centro de gravedad del saltador es importante para determinar su capacidad de salto. En el capítulo 8 veremos más sobre el centro de gravedad.

Resumen de términos

Aceleración Razón con la que cambia la velocidad de un objeto con el paso del tiempo; el cambio de velocidad puede ser en la magnitud, en la dirección o en ambas.

Caída libre Movimiento sólo bajo la influencia de la gravedad.

Cantidad vectorial En física la cantidad que tiene tanto magnitud como dirección.

Rapidez Que tan rápido mueve algo: la distancia que recorre un objeto por unidad de tiempo.

Velocidad La rapidez de un objeto y una especificación de la dirección de su movimiento.

Resumen de fórmulas

$$\text{Rapidez} = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}}$$

$$\text{Rapidez media} = \frac{\text{distancia total recorrida}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

$$\text{Aceleración (en una recta)} = \frac{\text{cambio en la rapidez}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

Velocidad en caída libre, a partir del reposo: $v = gt$

Distancia recorrida en caída libre, a partir del reposo;

$$d = 1/2 gt^2$$

Preguntas de repaso

El movimiento es relativo

1. Mientras lees esto, ¿con qué rapidez te mueves, en relación con la silla donde te sientas? ¿Y en relación con el Sol?

Rapidez

2. ¿Cuáles son las dos unidades de medida necesarias para describir la rapidez?

Rapidez instantánea

3. ¿Qué clase de rapidez indica el velocímetro de un automóvil, la rapidez media o la rapidez instantánea?

Rapidez media

4. Describe la diferencia entre rapidez instantánea y rapidez media.
5. ¿Cuál es la rapidez media, en kilómetros por hora, de un caballo que galopa 15 kilómetros en 30 minutos?
6. ¿Qué distancia recorre un caballo si durante 30 minutos galopa con una rapidez media de 25 km/h?

Velocidad

7. Explica la diferencia entre rapidez y velocidad.

Velocidad constante

8. Si un automóvil se mueve con velocidad constante, ¿también se mueve con rapidez constante?

Velocidad variable

9. Si un automóvil se mueve a 90 km/h y toma una curva también a 90 km/h, ¿mantiene constante su rapidez? ¿Mantiene constante su velocidad? Sustenta tus respuestas.

Aceleración

10. Describe la diferencia entre velocidad y aceleración.
11. ¿Cuál es la aceleración de un automóvil que aumenta su velocidad de 0 a 100 km/h en 10 s?
12. ¿Cuál es la aceleración de un automóvil que mantiene una velocidad constante de 100 km/h durante 10 s? (¿Por qué algunos de tus compañeros que contestaron bien la pregunta anterior tuvieron equivocada esta respuesta?)
13. ¿Cuándo sientes más el movimiento en un vehículo, cuando se mueve en forma continua en línea recta o cuando acelera? Si el automóvil se moviera con una velocidad absolutamente constante (sin baches en el camino), ¿te darías cuenta del movimiento?
14. La aceleración se suele definir como la razón de cambio de la velocidad con respecto al tiempo. ¿Cuándo se puede definir como la razón de cambio de la rapidez con respecto al tiempo?

La aceleración en los planos inclinados de Galileo

15. ¿Qué descubrió Galileo acerca de la cantidad de rapidez que gana una esfera cada segundo cuando rueda hacia abajo sobre un plano inclinado? ¿Qué le dijo eso acerca de la aceleración de la esfera?
16. ¿Qué relación descubrió Galileo para la velocidad adquirida en un plano inclinado?
17. ¿Qué relación descubrió Galileo entre la aceleración de una esfera y la pendiente de un plano inclinado? ¿Qué aceleración se obtiene cuando el plano es vertical?

Caída libre

Qué tan rápido

18. ¿Qué quiere decir exactamente un objeto en "caída libre"?
19. ¿Cuál es el aumento de rapidez, por segundo, de un objeto en caída libre?
20. ¿Qué velocidad adquiere un objeto en caída libre a los 5 s después de dejarse caer desde el reposo? ¿Y cuál es a los 6 s después?
21. La aceleración aproximada de la caída libre es 10 m/s^2 . ¿Por qué aparece dos veces la unidad "segundo"?
22. Cuando un objeto se lanza hacia arriba, ¿cuánta rapidez pierde cada segundo?

Hasta dónde

23. ¿Qué relación descubrió Galileo entre la distancia recorrida y el tiempo, para los objetos con aceleración?
24. ¿Cuál es la altura que cae un objeto, en caída libre, 1 s después de haber sido dejado caer desde el reposo? ¿Y después de 4 s?
25. ¿Qué efecto tiene la resistencia del aire sobre la aceleración de los objetos que caen? ¿Cuál es la aceleración de ellos sin resistencia del aire?

Qué tan rápido cambia de rapidez

26. Para las siguientes mediciones: 10 m, 10 m/s y 10 m/s^2 , ¿cuál es una medida de distancia, cuál es de rapidez y cuál es de aceleración?

Proyectos

1. Tu abuelita está interesada en tu progreso académico. Como la mayoría de las abuelitas ella quizá tiene escasa formación científica y se siente intimidada por las matemáticas. Escríbele una carta sin utilizar ecuaciones y explícale la diferencia entre velocidad y aceleración. Dile por qué algunos de tus compañeros confunden los dos conceptos y menciona algunos ejemplos para aclarar la confusión.
2. Párate junto a un muro y haz una marca en la altura máxima que puedas alcanzar. A continuación salta verticalmente y marca lo más alto que puedas. La distancia entre las dos marcas es la altura de tu salto. Con ella calcula tu tiempo en el aire.

Cálculos de un paso

Éstas son actividades del tipo “conéctate al número” para familiarizarte con las ecuaciones que vinculan los conceptos de física. En general, implican sustituciones de un paso y son menos desafiantes que los problemas.

$$\text{Rapidez} = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}}$$

1. Calcula la rapidez a la que caminas cuando das un paso de 1 metro en 0.5 segundos.
2. Calcula la rapidez de una bola de bolos que recorre 4 metros en 2 segundos.

$$\text{Rapidez promedio} = \frac{\text{distancia total recorrida}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

3. Calcula tu rapidez promedio si corres 50 metros en 10 segundos.
4. Calcula la rapidez promedio de una pelota de tenis que recorre la longitud completa de la cancha (24 metros) en 0.5 segundos.
5. Calcula la rapidez promedio de un guepardo que corre 140 metros en 5 segundos.
6. Calcula la rapidez promedio (en km/h) de Larry quien, para ir a la tienda, corre 4 kilómetros en 30 minutos

$$\text{Distancia} = \text{rapidez promedio} \times \text{tiempo}$$

7. Calcula la distancia (en km) que Larry corre si mantiene una rapidez promedio de 8 km/h durante 1 hora.
8. Calcula la distancia que recorrerás si mantienes una rapidez promedio de 10 m/s durante 40 segundos.
9. Calcula la distancia que recorrerás si mantienes una rapidez promedio de 10 km/h durante media hora.

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

10. Calcula la aceleración de un automóvil (en km/h·s) que parte del reposo y alcanza 100 km/h en 10 s.
11. Calcula la aceleración de un autobús que va desde los 10 km/h hasta una rapidez de 50 km/h en 10 segundos.
12. Calcula la aceleración de una pelota que parte del reposo, desciende rodando por una rampa y gana una rapidez de 25 m/s en 5 segundos.
13. En un planeta distante, un objeto en caída libre incrementa su rapidez a una razón constante de 20 m/s durante cada segundo de la caída. Calcula su aceleración.

$$\text{Rapidez instantánea} = \text{aceleración} \times \text{tiempo}$$

14. Calcula la rapidez instantánea (en m/s) a los 10 segundos para un automóvil que acelera a 2 m/s² desde el reposo.
15. Calcula la rapidez (en m/s) de un aficionado a la patineta que parte desde el reposo y acelera bajando una rampa durante 3 segundos con una aceleración de 5 m/s².

Velocidad adquirida en caída libre partiendo del reposo:

$$v = gt \text{ (donde } g = 10 \text{ m/s}^2\text{)}$$

16. Calcula la rapidez instantánea de una manzana que cae libremente desde una posición de reposo y acelera a 10 m/s² durante 1.5 segundos.
17. Se deja caer libremente un objeto desde el reposo. Calcula su rapidez instantánea después de 7 segundos.
18. Una paracaidista salta desde un helicóptero que vuela a gran altura. En la ausencia de resistencia del aire, ¿qué tan rápido irá cayendo después de 12 segundos de haber saltado?
19. En un planeta distante, un objeto en caída libre tiene una aceleración de 20 m/s². Calcula la rapidez que tendrá en 1.5 segundos un objeto que se deja caer desde el reposo en ese planeta.

$$\text{Distancia recorrida en caída libre a partir del reposo: } d = 1/2 gt^2$$

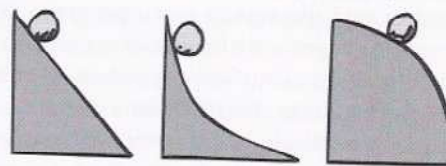
20. Una manzana cae de un árbol y golpea el suelo en 1.5 segundos. Calcula qué distancia recorrió en su caída.
21. Calcula la distancia vertical que en 12 segundos recorre un objeto que parte del reposo y cae libremente.
22. En un planeta distante, un objeto en caída libre tiene una aceleración de 20 m/s². Calcula la distancia vertical que recorre en 1.5 segundos un objeto que se deja caer desde el reposo en ese planeta.

Ejercicios

1. ¿Cuál es la rapidez de impacto de un automóvil que se mueve a 100 km/h y que golpea por detrás a otro que va en la misma dirección a 98 km/h?
2. Harry Hosthot puede remar en una canoa, en agua estancada, a 8 km/h. ¿Tendrá caso que reme contra la corriente de un río que fluye a 8 km/h?

3. ¿Las multas por exceso de velocidad son por la rapidez promedio o por la rapidez instantánea? Explica por qué.
4. Un avión vuela hacia el norte a 300 km/h, mientras que otro vuela hacia el sur a 300 km/h. ¿Son iguales sus rapidezces? ¿Son iguales sus velocidades? Explica por qué.
5. La luz viaja en línea recta con una rapidez constante de 300,000 km/s. ¿Cuál es su aceleración?
6. ¿Puede un automóvil que tiene velocidad hacia el norte, tener al mismo tiempo una aceleración hacia el sur? Explica cómo.
7. Viajas en un automóvil a un límite de rapidez específico y observas a otro automóvil que se acerca hacia ti con la misma rapidez. ¿Qué tan rápido se aproxima el otro automóvil a ti, en comparación con el límite de rapidez?
8. Para el movimiento rectilíneo, ¿cómo es que un velocímetro indica si ocurre aceleración o no?
9. ¿Un objeto puede invertir su dirección de recorrido mientras mantiene una aceleración constante? Si es así, da un ejemplo. Si no, explica por qué.
10. Vas manejando hacia el norte por una carretera. Entonces, sin modificar la rapidez, tomas una curva y comienzas a dirigirte hacia el este. a) ¿Tu velocidad cambia? b) ¿Aceleras? Explica tus respuestas.
11. Corrige a tu amigo que dice "el auto siguió la curva con una velocidad constante de 100 km/h".
12. Harry dice que la aceleración es la rapidez con que uno va. Carol dice que la aceleración es la rapidez con que uno adquiere rapidez. Los dos te miran y te piden tu opinión. ¿Quién tiene la razón?
13. Partiendo del reposo, un automóvil acelera hasta llegar a una rapidez de 50 km/h, y otro acelera hasta 60 km/h. ¿Puedes decir cuál de ellos tuvo la mayor aceleración? ¿Por qué?
14. Menciona un ejemplo donde tu rapidez sea cero, pero tu aceleración diferente de cero.
15. Señala un ejemplo de algo que tenga una rapidez constante y al mismo tiempo una velocidad variable. ¿Puedes describir un ejemplo de algo que tenga una velocidad constante y una rapidez variable? Sustenta tus respuestas.
16. Describe un ejemplo de algo que acelere y que al mismo tiempo se mueva con rapidez constante. ¿Puedes describir también un ejemplo de algo que acelere y al mismo tiempo tenga una velocidad constante? Explica por qué.
17. a) ¿Puede moverse un objeto cuando su aceleración es cero? b) ¿Puede acelerar un objeto cuando su velocidad es cero? En caso afirmativo, indica un ejemplo.
18. ¿Puedes describir un ejemplo en el que la aceleración de un cuerpo sea opuesta a la dirección de su velocidad? En caso afirmativo, ¿cuál es tu ejemplo?
19. ¿En cuál de las siguientes pendientes la bola rueda con rapidez en aumento y aceleración en disminu-

ción? (Usa este ejemplo si deseas explicar a alguien la diferencia entre rapidez y aceleración.)



20. Supón que las tres bolas del ejercicio 19 parten al mismo tiempo de las partes superiores. ¿Cuál llega primero al suelo? Explica por qué.
21. ¿Cuál es la aceleración de un automóvil que se mueve con velocidad constante de 100 km/h durante 100 segundos? Explica tu respuesta.
22. ¿Cuál es mayor, una aceleración de 25 a 30 km/h, o una de 96 a 100 km/h, si las dos suceden durante el mismo intervalo de tiempo?
23. Galileo hizo experimentos con esferas que ruedan en planos inclinados en ángulos que iban de 0 a 90°. ¿Qué intervalo de aceleraciones corresponde a este intervalo de ángulos?
24. Sé estricto y corrige a tu amigo que dice "en la caída libre, la resistencia del aire es más efectiva para desacelerar una pluma que una moneda".
25. Supón que un objeto en caída libre tuviera un velocímetro. ¿Cuánto aumentaría su indicación de velocidad en cada segundo de la caída?
26. Supón que el objeto en caída libre del ejercicio anterior también tuviera un odómetro. ¿Las indicaciones de la distancia de caída cada segundo serían iguales o distintas en los segundos sucesivos?
27. Para un objeto en caída libre que parte del reposo, ¿cuál es la aceleración al terminar el quinto segundo de caída? ¿Y al terminar el décimo segundo? Defiende tus respuestas.
28. Si se puede despreciar la resistencia del aire, ¿cómo se compara la aceleración de una pelota que se ha lanzado directamente hacia arriba, con su aceleración cuando tan sólo se deja caer?
29. Cuando un jugador de béisbol lanza una bola directamente hacia arriba, ¿cuánto disminuye la rapidez de ésta cada segundo cuando va hacia arriba? En ausencia de aire, ¿cuánto aumenta cada segundo al descender? ¿Cuánto tiempo necesita para subir, en comparación con el necesario para bajar?
30. Alguien que está parado al borde de un precipicio (como en la figura 3.9) lanza una pelota casi directamente hacia arriba, con determinada rapidez, y otra casi directamente hacia abajo con la misma rapidez inicial. Si se desprecia la resistencia del aire, ¿cuál pelota tiene mayor rapidez cuando llega hasta el fondo de la barranca?
31. Contesta la pregunta anterior cuando la resistencia del aire *no* es despreciable: cuando esa resistencia afecta al movimiento.

32. Si dejas caer un objeto, su aceleración hacia el piso es 10 m/s^2 . Pero si lo lanzas hacia abajo, ¿será mayor su aceleración que 10 m/s^2 ? ¿Por qué?
33. En el ejercicio anterior ¿te puedes imaginar una causa por la que la aceleración del objeto arrojado hacia abajo, por el aire, pueda ser bastante menor que 10 m/s^2 ?
34. Mientras ruedan esferas por un plano inclinado, Galileo observa que recorren un *antebrazo* (la distancia del codo a la punta de los dedos) mientras cuenta hasta 10. ¿Hasta dónde habría llegado la esfera, desde su punto de partida, cuando hubiera contado hasta 20?
35. Un proyectil se lanza verticalmente hacia arriba, y la resistencia del aire es despreciable. ¿Cuándo es mayor la aceleración de la gravedad: cuando sube, en la parte más alta o cuando desciende? Sustenta tu respuesta.
36. Si no fuera por la resistencia del aire, ¿sería peligroso salir a la intemperie en días lluviosos?
37. Amplía las tablas 3.2 y 3.3 para que incluyan tiempos de caída de 6 a 10 segundos, suponiendo que no hay resistencia del aire.
38. Cuando la rapidez aumenta para un objeto que cae libremente, ¿también se incrementa su aceleración?
39. Una pelota lanzada hacia arriba regresará al mismo punto con la misma rapidez inicial, cuando la resistencia del aire es insignificante. Cuando no es así, ¿cómo se compara la rapidez de retorno con su rapidez inicial?
40. Dos esferas se sueltan al mismo tiempo, desde el reposo, en el extremo izquierdo de las pistas A y B, de igual longitud, que se ven abajo. ¿Cuál de ellas llega primero al final de su pista?



41. Nos referiremos de nuevo a las pistas del ejercicio 40.
 - a) ¿En cuál de ellas es mayor la rapidez promedio?
 - b) ¿Por qué la rapidez de la esfera es la misma al final de las pistas?
42. En este capítulo hemos estudiado casos ideales de esferas que ruedan sobre planos lisos, y objetos que caen sin resistencia del aire. Supón que un compañero se queje de que todos estos conceptos de casos idealizados no tienen valor, simplemente porque los casos ideales no se presentan en el mundo real. ¿Qué responderías a su queja? ¿Cómo supones que respondería el autor de este libro?
43. ¿Por qué un chorro de agua se hace más angosto a medida que se aleja de la boca de la llave?



44. El "tiempo en el aire" de una persona sería bastante mayor en la Luna. ¿Por qué?
45. Formula dos preguntas de opción múltiple para comprobar la distinción que hacen tus compañeros entre velocidad y aceleración.

Problemas

1. En la actualidad, el nivel del mar está subiendo más o menos 1.5 mm cada año. A esta tasa, ¿dentro de cuántos años el nivel del mar estará 3 metros más alto?
2. ¿Cuál es la aceleración de un vehículo que cambia su velocidad de 100 km/h hasta paro total, en 10 s?
3. Se lanza una bola directamente hacia arriba, con una rapidez inicial de 30 m/s. ¿Hasta qué altura llega y cuánto tiempo estará en el aire (sin tener en cuenta la resistencia del aire)?
4. Se lanza una bola directo hacia arriba, con rapidez suficiente para permanecer varios segundos en el aire.
 - a) ¿Cuál es la velocidad de la bola cuando llega al punto más alto?
 - b) ¿Cuál es su velocidad 1 s antes de llegar al punto más alto?
 - c) ¿Cuál es su cambio de velocidad durante este intervalo de 1 s?
 - d) ¿Cuál es su velocidad 1 s después de haber alcanzado su punto más alto?
 - e) ¿Cuál es su cambio de velocidad durante este intervalo de 1 s?
 - f) ¿Cuál es su cambio de velocidad durante el intervalo de 2 s (1 antes y 1 después de llegar hasta arriba)? (¡Cuidado!)
 - g) ¿Cuál es la aceleración de la bola durante cualquiera de esos intervalos de tiempo, y en el momento en que tiene velocidad cero?
5. ¿Cuál es la velocidad instantánea de un objeto en caída libre 10 s después de haber partido del reposo? ¿Cuál es su velocidad promedio durante este intervalo de 10 s? ¿Qué altura habrá caído durante ese tiempo?
6. Un automóvil tarda 10 s en pasar de $v = 0$ a $v = 25 \text{ m/s}$ con una aceleración aproximadamente constante. Si deseas calcular la distancia recorrida con la ecuación $d = \frac{1}{2}at^2$, ¿qué valor usarías en a ?
7. Un avión de reconocimiento se aleja 600 km de su base, volando a 200 km/h, y regresa a ella volando a 300 km/h. ¿Cuál es su rapidez promedio?
8. Un coche recorre cierta carretera con una rapidez promedio de 40 km/h, y regresa por ella con una rapidez promedio de 60 km/h. Calcula la rapidez promedio en el viaje redondo. (¡No es 50 km/h!)
9. Si no hubiera resistencia del aire, ¿con qué rapidez caerían las gotas que se formarían en una nube a 1 km sobre la superficie terrestre? (¡Por suerte, esas gotas sufren la resistencia del aire cuando caen!)
10. Es sorprendente, pero muy pocos atletas pueden saltar a más de 2 pies (60 cm) sobre el piso. Usa $d = \frac{1}{2}gt^2$ y despeja el tiempo que tarda uno en subir en un salto vertical de 2 pies. A continuación multiplícalo por 2 para conocer el "tiempo en el aire": el tiempo que los pies de uno no tocan el piso.

Segunda ley de Newton



Efraín López muestra que cuando dos fuerzas se equilibran en cero, no hay aceleración.

En el capítulo 2 estudiamos el concepto de equilibrio mecánico, $\Sigma F = 0$, donde las fuerzas están en equilibrio. En este capítulo veremos lo que sucede cuando las fuerzas no están en equilibrio, es decir, cuando las fuerzas netas *no* son iguales a cero. La fuerza neta de un balón de fútbol sóquer que se pateo, por ejemplo, es mayor que cero, y el movimiento del balón cambia de manera abrupta. Su trayectoria en el aire no es rectilínea, sino curva y hacia abajo debido a la gravedad; de nuevo tenemos un cambio en el movimiento. La mayoría del movimiento que vemos sufre cambios. En este capítulo veremos los *cambios* en el movimiento: el movimiento acelerado.

En el capítulo anterior aprendimos que la aceleración determina qué tan rápido cambia el movimiento. Específicamente, es el cambio de velocidad durante cierto intervalo de tiempo. Recuerda la definición de aceleración:

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{cambio de velocidad}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

Ahora nos enfocaremos en lo que *causa* la aceleración: *la fuerza*.



Segunda ley de Newton

La fuerza causa aceleración

Considera un disco (*puck*) de hockey que está en reposo sobre el hielo. Si le aplicas una **fuerza**, entonces comienza a moverse y acelera. Cuando el palo (*stick*) de hockey ya no lo está impulsando, el disco se mueve a velocidad constante. Si se aplica otra fuerza que golpee al disco, otra vez, el movimiento cambia. La aceleración es causada por la fuerza.

A menudo hay más de una fuerza que actúa sobre un objeto. Es decir, pueden intervenir varias fuerzas. Del capítulo 2 recuerda que la suma de fuerzas que actúan sobre un objeto es la **fuerza neta**. La aceleración depende de la **fuerza neta**. Para incrementar la aceleración de un objeto, debes aumentar la fuerza neta que actúa sobre éste. Si aplicas el doble de fuerza neta, su aceleración será del doble; si aplicas el triple de fuerza neta, se triplicará la aceleración; y así sucesivamente. Decimos que la aceleración producida es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él y se escribe así:

$$\text{Aceleración} \sim \text{fuerza neta},$$

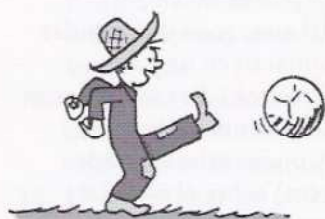


FIGURA 4.1

Patea el balón y éste acelera.



La fuerza causa aceleración

El símbolo $\sim$ quiere decir “es directamente proporcional a”. Entonces, cualquier cambio en una produce la misma cantidad de cambio en la otra.

EXAMÍNA TE

1. Estás empujando una caja que está sobre un suelo liso, y acelera. Si aplicas cuatro veces esa fuerza neta, ¿cuánto aumentará la aceleración?
2. Si empujas con la misma fuerza incrementada sobre la misma caja, la cual se desliza en un suelo muy áspero, ¿cómo se comparará la aceleración con la que hubo en el suelo liso? (*¡Piensa antes de leer la respuesta más adelante!*)

Fricción

La fuerza de la mano acelera el ladrillo



Si la fuerza es del doble, la aceleración también es el doble



Si la fuerza es del doble y la masa es del doble se produce la misma aceleración

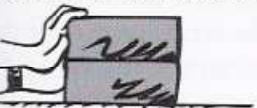


FIGURA 4.2

La aceleración es directamente proporcional a la fuerza.

Cuando las superficies de dos objetos se deslizan entre sí o tienden a hacerlo, actúa una fuerza de **fricción** o **rozamiento**. Cuando aplicas una fuerza a un objeto, por lo general, una fuerza de fricción reduce la fuerza neta y la aceleración que resulta. La fricción se debe a las irregularidades en las superficies que están en contacto mutuo, y depende de los materiales y de cuánto se opriman entre sí. Hasta las superficies que parecen muy lisas tienen irregularidades microscópicas que estorban el movimiento. Los átomos se adhieren entre sí en muchos puntos de contacto. Cuando un objeto se desliza contra otro, debe subir sobre los picos de las irregularidades, o se deben desprender los átomos por la fricción. En cualquiera de los casos se requiere una fuerza.

La dirección de la fuerza de fricción siempre es opuesta al movimiento. Un objeto que se desliza *de bajada* por un plano inclinado está sometido a una fricción dirigida *de subida* por el plano; un objeto que se desliza hacia la *derecha* está sometido a una fricción dirigida hacia la *izquierda*. Así, si se debe mover un objeto a velocidad constante, se le debe aplicar una fuerza igual a la fuerza opuesta de la fricción, de manera que las dos fuerzas se anulen exactamente entre sí. La fuerza neta igual cero causa una aceleración cero y velocidad constante.

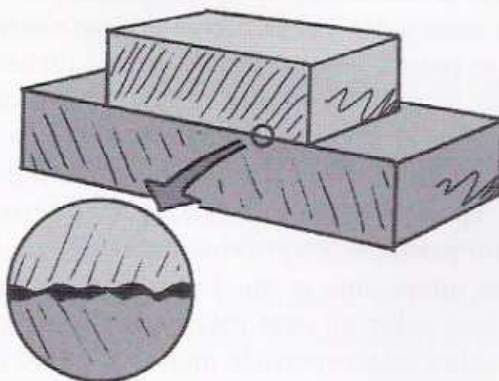


FIGURA 4.3

La fricción (rozamiento) resulta del mutuo contacto entre las irregularidades en la superficie de los objetos que se deslizan. Hasta las superficies que parecen muy lisas tienen irregularidades cuando se observan a escala microscópica.

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Tendrá una aceleración cuatro veces mayor.
2. Tendrá menos aceleración, ya que la fricción reducirá la fuerza neta.



La fuerza causa aceleración

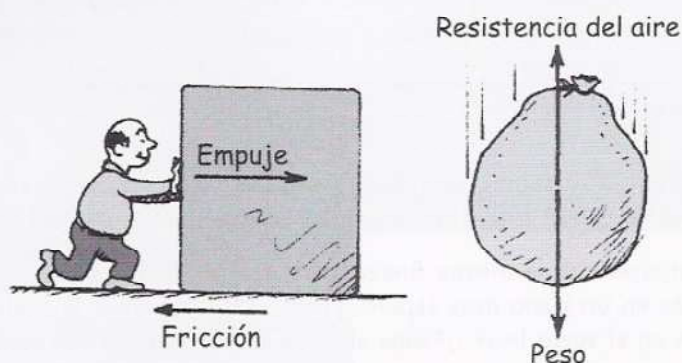


FIGURA 4.4

La dirección de la fuerza de fricción siempre es opuesta a la dirección del movimiento. (Primera figura) Si empujas una caja a la derecha, la fricción actúa hacia la izquierda. (Segunda figura) Cuando el saco cae, la fricción con el aire (resistencia del aire) actúa hacia arriba. (¿Cuál será la aceleración del saco cuando la resistencia del aire sea igual al peso del saco?)

No hay fricción en una caja que está en reposo sobre un suelo horizontal. Sin embargo, cuando se perturban las superficies de contacto al empujar la caja en dirección horizontal, se produce la fricción. ¿Cuánta? Si la caja sigue en reposo, la fricción que se opone al movimiento es justo la necesaria para anular el empuje. Si empujas horizontalmente con, digamos, 70 newtons, la fricción será de 70 newtons. Si empujas más, por ejemplo con 100 newtons y la caja está a punto de deslizarse, la fricción entre la caja y el suelo opone 100 newtons a tu empuje. Si los 100 newtons es lo más que pueden resistir las superficies, entonces cuando empujes con un poco más de fuerza se rompe la adherencia y la caja se desliza.¹

Un hecho interesante es que, en el deslizamiento, la fricción es algo menor que la fricción que se acumula antes de que haya deslizamiento. Los físicos y los ingenieros distinguen entre *fricción estática* y *fricción de deslizamiento*. Para ciertas superficies, la fricción estática es un poco mayor que la fricción de deslizamiento. Cuando empujas una caja, requieres más fuerza para que ésta empiece a moverse, que para mantenerla deslizándose. Antes de que apareciera el sistema de frenos antibloqueo, un frenado de emergencia era bastante problemático. Cuando los neumáticos se inmovilizan, patinan y proporcionan menor fricción que si siguieran rodando hasta pararse. Mientras rueda el neumático, su superficie no resbalará por la superficie del camino y la fricción será estática y, en consecuencia, será mayor que la de deslizamiento. Pero una vez que los neumáticos comienzan a patinar, se reduce la fuerza de fricción, lo cual no es nada halagüeño. Un sistema de frenos antibloqueo mantiene a los neumáticos abajo del umbral de inmovilizarse en un patinazo.

También es interesante que la fuerza de fricción no depende de la rapidez. Un automóvil que se patina a baja rapidez tiene, aproximadamente, la misma fricción que uno que se patina con alta rapidez. Si la fuerza de fricción de una caja que se desliza sobre el suelo es 90 newtons a baja rapidez, será también, con mucha aproximación, de 90 newtons a mayor rapidez. Puede ser mayor cuando la caja está en reposo y a punto de deslizarse; pero una vez en movimiento, la fuerza de fricción permanece aproximadamente igual.

Todavía más interesante es que la fricción no dependa del área de contacto. Si la caja se desliza sobre su cara más pequeña, todo lo que haces es concentrar el mismo peso sobre una superficie menor y, como resultado, la fricción será la misma. Entonces, los neumáticos extraanchos que ves en algunos automóviles no ofrecen mayor fricción que los angostos. Simplemente lo que hace el neumático más ancho es repartir el peso del vehículo sobre una superficie mayor, para redu-

¹ Aun cuando no lo parezca todavía, en física la mayoría de los conceptos en realidad no son complicados. Pero la fricción es distinta. A diferencia de esa mayor parte de los conceptos, la fricción es un fenómeno muy complicado. Los hallazgos son empíricos (y se adquieren con una gran variedad de experimentos) y las predicciones son aproximadas y también se basan en experimentos.



FIGURA 4.5

La fricción entre el neumático y la superficie de rodamiento casi es igual cuando el neumático es ancho que cuando es angosto. La finalidad de la mayor superficie de contacto es reducir el calentamiento y el desgaste.

cir el calentamiento y el desgaste. De igual modo, la fricción entre un camión y el suelo es la misma sin importar si el camión tiene 4 o ¡18 neumáticos! Cuando hay más neumáticos la carga se distribuye sobre una superficie mayor y tan sólo se reduce la presión en cada neumático. Es interesante que la distancia de frenado al aplicar los frenos no está afectada por la cantidad de neumáticos. Pero el desgaste de éstos depende mucho de su número.

La fricción no se restringe a sólidos que se deslizan entre sí. También se presenta en líquidos y gases, que colectivamente se llaman *fluidos* (porque fluyen). La fricción de los fluidos ocurre cuando un objeto aparta el fluido a través del cual se mueve. ¿Alguna vez has intentado correr 100 m con el agua llegándote a la cintura? La fricción de los fluidos es significativa incluso a rapideces bajas. Una forma muy común de fricción de fluidos para algo que se mueve a través del aire es la *resistencia del aire*, también llamada *resistencia aerodinámica*. Por lo común, no nos damos cuenta de la resistencia del aire cuando estamos caminando o trotando; pero sí la notamos al ir a mayor rapidez cuando vamos en bicicleta o cuando bajamos una pendiente pronunciada en la montaña rusa. La resistencia del aire se incrementa conforme aumenta la rapidez. En la figura 4.4 el saco que cae alcanzará una velocidad constante cuando la resistencia del aire se equilibra con el peso del mismo.

EXAMÍNATE

¿Qué fuerza neta actúa sobre una caja que se desliza cuando ejerces sobre ella una fuerza de 110 N y la fricción entre la caja y el suelo es 100 N?

Masa y peso

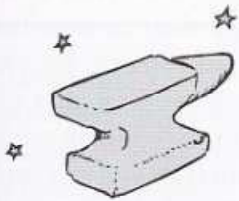


FIGURA 4.6

Un yunque en el espacio exterior, por ejemplo entre la Tierra y la Luna, perdería peso, pero no perdería su masa.

La aceleración que adquiere un objeto no sólo depende de las fuerzas aplicadas y de las fuerzas de fricción, sino también de la inercia del objeto. La cantidad de inercia que posee un objeto depende de la cantidad de materia que haya en él; cuanto más materia haya, habrá mayor inercia. Para indicar cuánta materia tiene algo se usa el término *masa*. Cuanto mayor masa tenga un objeto, su inercia será mayor. La *masa* es una medida de la inercia de un objeto material.

La masa corresponde a nuestra noción intuitiva de *peso*. De ordinario decimos que algo tiene mucha materia cuando pesa mucho. Pero hay una diferencia entre masa y peso. Definiremos cada término como sigue:

Masa: *cantidad de materia en un objeto. Es también la medida de la inercia u oposición que muestra un objeto en respuesta a algún esfuerzo para ponerlo en movimiento, detenerlo o cambiar de cualquier forma su estado de movimiento.*

Peso: *fuerza sobre un objeto debida a la gravedad.*

En ausencia de aceleración la masa y el peso son directamente proporcionales entre sí.² Si la masa de un objeto se duplica, también lo hará su peso; si la masa

COMPRUEBA TU RESPUESTA

10 N, en la dirección en que empujas (110 N – 100 N).

² El peso y la masa son directamente proporcionales entre sí; el peso = mg y la constante de proporcionalidad es g , que tiene el valor de 9.8 N/kg. Asimismo, g es la aceleración debida a la gravedad, 9.8 m/s^2 (las unidades N/kg equivalen a m/s^2). En el capítulo 9, ampliaremos la definición de peso como la fuerza que un objeto ejerce sobre una superficie de apoyo.



FIGURA 4.7

El astronauta ve que en el espacio es difícil agitar el yunque "sin peso", tan difícil como en la Tierra. Si el yunque tiene más masa que el astronauta, ¿qué se agitará más, el yunque o el astronauta?

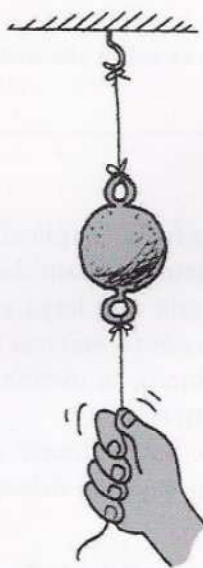


FIGURA 4.8

¿Por qué un aumento lento y continuo de la fuerza hacia abajo rompe el cordel sobre la esfera masiva, mientras que un tirón repentino rompería el cordel de abajo?

se reduce a la mitad, el peso también disminuye a la mitad. Por ello con frecuencia se intercambian masa y peso. Asimismo, a veces se confunde entre ellos, porque se acostumbra a medir la cantidad de materia en las cosas (la masa) con su atracción gravitacional hacia la Tierra (el peso). No obstante, la masa es más fundamental que el peso: es una cantidad fundamental que escapa por completo a la noción de la mayoría de los individuos.

Hay veces en que el peso corresponde a nuestra noción inconsciente de inercia. Por ejemplo, si tratas de determinar cuál de dos objetos pequeños es más pesado, los podrías agitar en tus manos, o moverlos de alguna manera, en vez de levantarlos. Al hacer ese movimiento estás apreciando cuál de los dos es más difícil de poner en movimiento; sabes cuál de los dos se resiste más a un cambio de movimiento. En realidad estás comparando la inercia de los objetos.

En Estados Unidos, la cantidad de materia en un objeto se suele describir a través del tirón de la gravedad entre éste y la Tierra, es decir, por su *peso*, que se acostumbra expresar en *libras*. Sin embargo, en la mayor parte del orbe la medida de la materia se expresa normalmente en **kilogramos**, que son unidad de masa. En la superficie de la Tierra, un ladrillo con 1 kilogramo de masa pesa 2.2 libras. En el sistema métrico, la unidad de fuerza es el **newton**, que es igual a un poco menos de un cuarto de libra (como el peso de una hamburguesa de un cuarto de libra *después* de cocinarla). Un ladrillo de 1 kilogramo pesa aproximadamente 10 N (con más exactitud, 9.8 N).³ Lejos de la superficie terrestre, donde la influencia de la gravedad es menor, un ladrillo de 1 kilogramo pesa menos. También pesaría menos en la superficie de planetas con menor gravedad que la de la Tierra. Por ejemplo, en la superficie de la Luna, donde la fuerza de gravedad sobre los objetos es de sólo un sexto de la de la Tierra, un ladrillo de 1 kilogramo pesa más o menos 1.6 newtons (o 0.36 libras). En planetas con mayor gravedad pesaría más; sin embargo, la masa del ladrillo sería igual en cualquier parte. El ladrillo ofrece la misma resistencia a acelerarse o a desacelerarse, independientemente de si está en la Tierra, en la Luna, o en cualquier cuerpo que lo atraiga. En una nave espacial a la deriva, donde una báscula indicaría cero para un ladrillo, éste sigue teniendo masa. Aun cuando no oprima el plato de la báscula, tiene la misma resistencia a cambiar de movimiento que la que tiene en la Tierra. Para agitar el ladrillo de un lado a otro, un astronauta debe ejercer exactamente la misma fuerza en una nave espacial que en la Tierra. Tendrías que ejercer la misma cantidad de empuje para acelerar un camión grande hasta determinada rapidez, sobre una superficie horizontal en la Luna que en la Tierra. No obstante, la dificultad de *levantarlo* contra la fuerza de la gravedad (el peso) es algo distinto. La masa y el peso son diferentes entre sí (figuras 4.6 y 4.7).

Una buena demostración de la diferencia entre masa y peso es una esfera masiva colgada de un cordel como se muestra en la figura 4.8. El cordel de arriba se revienta cuando se tira de abajo con una fuerza que aumenta gradualmente; pero cuando se le da un tirón brusco, se revienta de la parte de abajo. ¿Cuál de estos casos ilustra el peso de la esfera, y cuál la masa de ésta? Observa que sólo el cordel de arriba sostiene el peso de la esfera. Así, cuando se tira lentamente del cordel de abajo, la tensión que provoca el tirón se transmite a la parte superior. Entonces, la tensión total en el cordel de arriba es igual al tirón más el peso de la

³ Entonces, 2.2 lb equivalen a 9.8 N, o sea que 1 N equivale aproximadamente a 0.22 lb; más o menos el peso de una manzana. En el sistema métrico se acostumbra a especificar la materia en unidades de masa (en gramos o kilogramos), y casi nunca en unidades de peso (o newtons). En Estados Unidos y en lugares donde se usa el sistema inglés de unidades, las cantidades de materia se suelen especificar en unidades de peso (en libras). (No se conoce mucho la unidad de masa en el sistema inglés: el *slug*.) Véase el apéndice I, con más explicaciones acerca de los sistemas de medidas.

esfera. El cordel de arriba se rompe cuando se llega al punto de rotura. Pero cuando se da un tirón brusco al cordel de abajo, la masa de la esfera, cuya tendencia es a permanecer en reposo, es la responsable de que el cordel se rompa de abajo.

También es fácil confundir la masa con el **volumen**. Cuando imaginamos un objeto masivo con frecuencia lo vemos como un objeto grande. Sin embargo, el tamaño (volumen) de un objeto, no es siempre una buena forma de analizar su masa. ¿Qué es más fácil de poner en movimiento, el acumulador de un automóvil o una caja de cartón vacía del mismo tamaño? Entonces se ve que la masa no es igual al peso ni es igual al volumen.



EXAMÍNA TE

1. ¿La *inercia* de un bloque de hierro de 2 kg es del doble que la de un bloque de hierro de 1 kg? ¿Su *masa* es el doble? ¿Su *volumen* es el doble? ¿Su *peso* es el doble?
2. ¿Sería más fácil levantar en la Tierra un camión cargado con cemento, que en la Luna?
3. Pide a un amigo que clave un clavo pequeño en un trozo de madera que esté sobre una pila de libros y sobre tu cabeza. ¿Por qué no te daña?

Una masa se resiste a acelerar

Si empujas a un amigo que está sobre una patineta, tu amigo acelera; pero si empujas igual a un elefante que esté sobre una patineta, su aceleración será mucho menor. Verás que la cantidad de aceleración no sólo depende de la fuerza, sino también de la masa que empujas. La misma fuerza aplicada al doble de masa produce la mitad de la aceleración. Con tres masas, la aceleración es la tercera parte. Se dice que la aceleración que produce determinada fuerza es inversamente proporcional a la masa; esto es,

$$\text{Aceleración} \sim \frac{1}{\text{masa}}$$



Cuando dos cantidades son directamente proporcionales entre sí, cuando una aumenta, la otra también lo hace. Sin embargo, cuando las dos son inversamente proporcionales entre sí, cuando una aumenta, la otra disminuye.

¡EUREKA!

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Las respuestas de todas las partes son *sí*. Un trozo de hierro de 2 kg tiene doble cantidad de átomos de hierro y, en consecuencia, dos veces la cantidad de materia y de masa. En el mismo lugar, también su peso es doble. Y como ambos trozos tienen la misma densidad (la misma razón de masa/volumen), el trozo de 2 kg tiene el doble del volumen.
2. Un camión de cemento se levantaría con mayor facilidad en la Luna, porque ahí la fuerza de gravedad es menor. Cuando *levantas* un objeto, estás actuando contra la fuerza de gravedad (su peso). Aunque su masa sea igual en la Tierra, en la Luna o en cualquier lugar, su peso sólo es 1/6 en la Luna, de manera que sólo se requiere 1/6 de la fuerza para levantarlo. Sin embargo, para moverlo horizontalmente no empujas contra la gravedad. Cuando la masa es el único factor, fuerzas iguales producen aceleraciones iguales, ya sea que el objeto esté en la Tierra o en la Luna.
3. La masa relativamente grande de los libros y del bloque sobre tu cabeza se resiste al movimiento. La fuerza que puede meter bien el clavo no tiene el mismo efecto para acelerar los libros y el bloque, que son masivos y no se mueven mucho al golpear el clavo. ¿Puedes ver la semejanza de este ejemplo con la demostración con la esfera masiva suspendida, cuando no se rompe el cordel de arriba al momento de tirar violentamente de la parte de abajo?

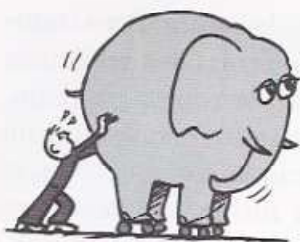


FIGURA 4.9

Figura interactiva

Cuanto mayor masa, se debe ejercer mayor fuerza para obtener cierta aceleración.



FIGURA 4.10

Se requiere una gran fuerza para acelerar este camión de volteo de tres pisos cuando lleva su carga común de 350 ton.

Inversamente quiere decir que los dos valores cambian en dirección contraria. Cuando aumenta el denominador, toda la cantidad disminuye. Por ejemplo, $1/100$ es menor que $1/10$.

Segunda ley de Newton del movimiento



La fuerza causa aceleración

Newton fue el primero que descubrió la relación entre los tres conceptos fundamentales de física: aceleración, fuerza y masa. Propuso una de las más importantes leyes de la naturaleza, su segunda ley del movimiento. La segunda ley de Newton establece que

La aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él, tiene la dirección de la fuerza neta y es inversamente proporcional a la masa del objeto.

En resumen, esto dice que:

$$\text{Aceleración} \sim \frac{\text{fuerza neta}}{\text{masa}}$$

Usaremos la línea ondulada $\sim$ como símbolo que indica “es proporcional a”. Se dice que la aceleración a es directamente proporcional a la fuerza neta general F e inversamente proporcional a la masa m . Eso quiere decir que si F aumenta, a se incrementa con el mismo factor (si F es doble, a es doble); pero si m aumenta, a disminuye con el mismo factor (si m se duplica, a se reduce a la mitad).

Usando las unidades de manera consistente, como newtons (N) para fuerza, kilogramos (kg) para masa y metros por segundo al cuadrado (m/s^2) para aceleración, la proporcionalidad se puede convertir en una ecuación exacta:

$$\text{Aceleración} = \frac{\text{fuerza neta}}{\text{masa}}$$

De manera breve, donde a es la aceleración, F_{net} es la fuerza neta y m es la masa, lo cual se expresa como

$$a = \frac{F_{\text{net}}}{m}$$

Un objeto se acelera en la dirección de la fuerza que actúa sobre él. Si se aplica en la dirección de movimiento del objeto, la fuerza aumentará la rapidez del objeto.

La fuerza que ejerce la mano acelera el ladrillo



La misma fuerza acelera 2 ladrillos a la mitad



Con 3 ladrillos, la aceleración es 1/3 de la original

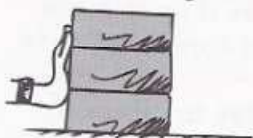


FIGURA 4.11

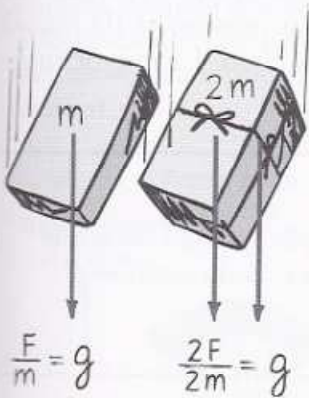
La aceleración es inversamente proporcional a la masa de los cuerpos.

Si se aplica en dirección contraria, disminuirá su rapidez. Si se aplica en ángulo recto, desviará al objeto. Cualquier otra dirección de aplicación dará como resultado una combinación de cambio de rapidez y de dirección. *La aceleración de un objeto tiene siempre la dirección de la fuerza neta.*

EXAMÍNAME

1. En el capítulo anterior la aceleración se definió como la razón de cambio de la velocidad con respecto al tiempo; esto es, $a = (\text{cambio de } v)/\text{tiempo}$. En este capítulo, ¿estamos diciendo que la aceleración es más bien la relación de la fuerza entre la masa, esto es, que $a = F/m$? ¿Cuál de las dos es cierta?
2. Un avión jumbo viaja a la velocidad constante de 1,000 km/h cuando la fuerza de empuje de sus motores es una constante de 100,000 N. ¿Cuál es la aceleración del avión? ¿Cuál es la fuerza de resistencia del aire que actúa sobre el avión?

Cuando la aceleración es g (caída libre)



Aunque Galileo usó los conceptos de inercia y de aceleración, y fue quien primero midió la aceleración de objetos que caen, no pudo explicar por qué los objetos de diversas masas caen con aceleraciones iguales. La segunda ley de Newton es la explicación.

Sabemos que un cuerpo que cae acelera hacia la Tierra debido a la fuerza de atracción gravitacional entre el objeto y la Tierra. Cuando la fuerza de gravedad es la única que actúa, es decir, cuando fricciones como la del aire son despreciables, se dice que el objeto está en **caída libre**.

Cuanto mayor sea la masa de un objeto, mayor será la fuerza de atracción gravitacional entre éste y la Tierra. Por ejemplo, el ladrillo doble de la figura 4.12 tiene el doble de atracción gravitacional que el ladrillo único. ¿Por qué, entonces, como

FIGURA 4.12

Figura interactiva

La relación del peso (F) entre la masa (m) es igual para todos los objetos en el mismo lugar; por consiguiente, cuando no hay resistencia del aire sus aceleraciones son iguales.



Explicación de la
aceleración en caída libre

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. La aceleración se define como la razón de cambio de la velocidad con respecto al tiempo, y *la produce* una fuerza. La magnitud de fuerza/masa (la causa) determina la razón de cambio de v /tiempo (el efecto). Así, si bien definimos la aceleración en el capítulo 3, en este capítulo definimos los términos que producen la aceleración.
2. La aceleración es cero porque la velocidad es constante. Como la aceleración es cero, por la segunda ley de Newton se sigue que la fuerza neta es cero, lo cual significa que la fuerza de resistencia aerodinámica debe ser igual a la fuerza de empuje de 100,000 N y debe actuar en la dirección contraria. Entonces, la resistencia aerodinámica sobre el avión es 100,000 N. (Observe que no necesitamos saber la velocidad del avión para contestar esta pregunta. Únicamente necesitamos saber que es constante, nuestra clave para afirmar que la aceleración y, por lo tanto, la fuerza neta, es cero.)



Solamente una fuerza actúa sobre un objeto en caída libre: la fuerza de gravedad.

¡EUREKA!

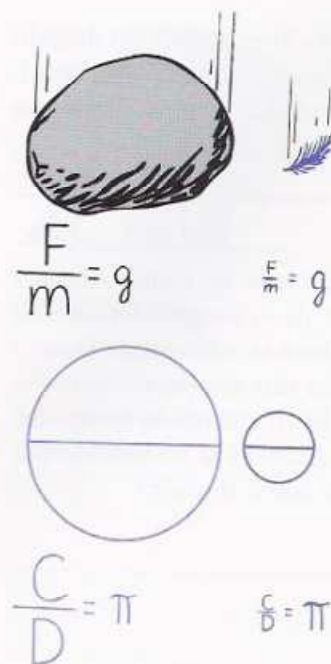


FIGURA 4.13

La relación del cociente entre el peso (F) y la masa (m) es igual en la piedra grande y en la pluma pequeña; asimismo, la razón entre el perímetro de la circunferencia (C) y el diámetro (D) es igual para el círculo grande y para el pequeño.

suponía Aristóteles, la caída del ladrillo doble no tiene el doble de rapidez? La respuesta es que la aceleración de un objeto no sólo depende de la fuerza, en este caso, el peso, sino también de la resistencia del cuerpo a moverse, su inercia. Mientras que una fuerza produce una aceleración, la inercia es una *resistencia a* la aceleración. Así, el doble de fuerza que se ejerce sobre el doble de inercia produce la misma aceleración que la mitad de la fuerza ejercida sobre la mitad de la inercia. Los dos cuerpos aceleran por igual. La aceleración debida a la gravedad tiene el símbolo g . Usaremos este símbolo g , en vez de a , para indicar que la aceleración sólo se debe a la gravedad.

La relación de peso a masa en objetos en caída libre es igual a la constante g . Se parece a la relación constante de la circunferencia al diámetro de los círculos, que es igual a la constante π . La relación del peso a la masa es igual para objetos pesados que para objetos ligeros, del mismo modo que la relación de la circunferencia al diámetro es igual tanto para círculos grandes como para los pequeños (figura 4.13).

Ahora comprendemos que la aceleración de la caída libre es independiente de la masa de un objeto. Una piedra 100 veces más masiva que un guijarro cae con la misma aceleración que el guijarro, porque aunque la fuerza sobre la piedra (su peso) es 100 veces mayor que la fuerza sobre el guijarro, su resistencia (la masa) a cambiar el movimiento es 100 veces mayor que la del guijarro. La mayor fuerza se compensa con la masa igualmente mayor.

EXAMÍNAME

En el vacío, una moneda y una pluma caen igual, lado a lado. ¿Es correcto decir que fuerzas iguales de gravedad actúan en la moneda y en la pluma cuando están en el vacío?

Cuando la aceleración es menor que g (caída no libre)



Cuando Galileo intentó explicar porque todos los objetos caen con la misma aceleración, ¿no le habría encantado conocer la regla $a = F/m$?

¡EUREKA!

Los objetos que caen en el vacío son una cuestión, pero, ¿y los casos de objetos que caen en el aire? Aunque una pluma y una moneda caen con igual aceleración en el vacío, lo hacen en forma muy distinta en el aire. ¿Cómo se aplican las leyes de Newton a objetos que caen en el aire. La respuesta es que las leyes de Newton se aplican a *todos* los objetos, ya sea que caigan libremente o que caigan en presencia de fuerzas de resistencia. No obstante, las aceleraciones son muy diferentes en ambos casos. Lo importante que se debe tener en cuenta es la idea de una *fuerza neta*. En el vacío, o en los casos en que se puede despreciar la resistencia del aire, la fuerza neta es igual al peso, ya que es la única fuerza. Sin embargo, en presencia de la resistencia del aire, sin embargo, la fuerza neta es menor que el

COMPRUEBA TU RESPUESTA

No, no, no. ¡Mil veces no! Estos objetos tienen la misma aceleración, pero no porque las fuerzas de gravedad que actúan sobre ellos sean iguales, sino porque las *relaciones* de sus pesos entre sus masas son iguales. Aunque en el vacío no hay resistencia del aire, sí hay gravedad (bien que lo sabrías, si pusieras tu mano en una cámara de vacío y sobre ella pasara un camión como el de la figura 4.10). Si contestaste que *sí* a esta pregunta, ¡considérala una advertencia para que tengas más cuidado cuando pienses en física!



Caída y resistencia del aire

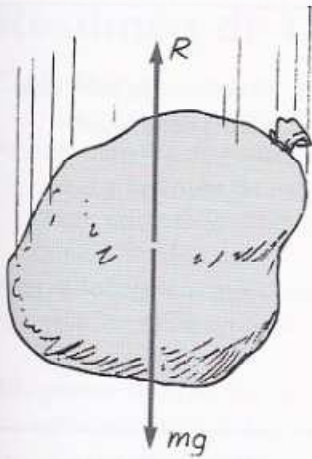


FIGURA 4.14

Cuando el peso mg es mayor que la resistencia del aire R , el saco que cae acelera. A mayores rapidez R aumenta. Cuando $R = mg$, la aceleración es cero y el saco alcanza su velocidad terminal.



FIGURA 4.15

Figura interactiva

El paracaidista más pesado debe caer con más rapidez que la paracaidista más ligera, para que la resistencia del aire iguale a su peso, que es mayor.

peso, es el peso menos la resistencia aerodinámica, fuerza que se presenta debido a la resistencia del aire.⁴

La fuerza de resistencia del aire que actúa sobre un objeto que cae depende de dos factores. En primer lugar, depende de su área frontal, es decir, de la cantidad de aire que debe cortar en su caída. En segundo lugar, depende de la rapidez del objeto que cae: cuanto mayor sea la rapidez, mayor será la cantidad de moléculas de aire con que se encuentra un objeto en cada segundo y también serán mayores las fuerzas debidas a los impactos moleculares. La resistencia aerodinámica depende de la superficie y de la rapidez del objeto que cae.

En algunos casos la resistencia del aire afecta mucho la caída, y en otros no. La resistencia aerodinámica es importante en la caída de una pluma. Como la pluma tiene tanta superficie en comparación con su peso tan bajo, no cae mucho antes de que la resistencia del aire, con dirección hacia arriba, anule el peso que actúa hacia abajo. Entonces, la fuerza neta sobre la pluma es cero y la aceleración termina. Al terminarse la aceleración se dice que el objeto alcanzó su **rapidez terminal**. Si nos ocupamos además de la dirección, que es hacia abajo para los objetos que caen, decimos que el objeto llegó a su **velocidad terminal**. La misma idea se aplica a todos los objetos que caen por el aire; por ejemplo, en el paracaidismo. Cuando se lanza un paracaidista, aumenta su rapidez y, por lo tanto, aumenta la resistencia del aire hasta que se iguala al peso de la persona. Cuando eso sucede, la *fuerza neta* se vuelve cero, y la aceleración del paracaidista se anula porque ha alcanzado su velocidad terminal. Para una pluma la velocidad terminal es algunos centímetros por segundo; en tanto que para un paracaidista es de unos 200 kilómetros por hora. El paracaidista puede variar esa velocidad cambiando de posición. En la posición de cabeza o de pie se encuentra con menos aire y, en consecuencia, con menos resistencia aerodinámica, y alcanza su velocidad terminal máxima. Una velocidad terminal menor se alcanza si uno se extiende, del mismo modo que lo haría una ardilla voladora. Cuando se abre el paracaídas se llega a la velocidad terminal mínima.

Supongamos que un hombre y una mujer se lanzan en paracaídas desde la misma altura y al mismo tiempo (figura 4.15) y que el hombre pesa el doble que la mujer, pero que sus paracaídas tienen el mismo tamaño y se abren desde el principio. El paracaídas del mismo tamaño quiere decir que con rapidez iguales la resistencia del aire es igual en cada uno. ¿Quién llega primero al suelo, el hombre pesado o la mujer ligera? La respuesta es que la persona que cae con mayor rapidez llega primero al suelo; esto es, la persona que tiene la mayor rapidez terminal. Al principio creeríamos que como los paracaídas son iguales, las rapidez terminales de los dos serían iguales, y que en consecuencia los dos llegarían juntos al suelo. Sin embargo, eso no sucede porque también la resistencia del aire depende de la rapidez. Una mayor rapidez equivale a una mayor fuerza de impacto en el aire. La mujer llegará a su rapidez terminal cuando la resistencia del aire contra su paracaídas sea igual a su peso. Cuando eso sucede, la resistencia del aire contra el paracaídas del hombre no habrá igualado a su peso todavía. Debe caer con mayor rapidez que ella, para que la resistencia del aire coincida con su peso mayor.⁵ La velocidad terminal es mayor para la persona más pesada y como resultado ésta llega primero al suelo.

⁴ En notación matemática, $a = \frac{F_{\text{net}}}{m} = \frac{mg - R}{m}$, donde mg es el peso y R es la resistencia del aire. Observa que cuando $R = mg$, $a = 0$; entonces, sin aceleración, el objeto cae a velocidad constante. Con un poco de álgebra, avanzamos más y tenemos $a = \frac{F_{\text{net}}}{m} = \frac{mg - R}{m} = g - \frac{R}{m}$. Vemos que la aceleración a siempre será menor que g si la resistencia del aire R impide la caída. Sólo cuando $R = 0$, $a = g$.

⁵ La rapidez terminal del hombre, que pesa el doble, es aproximadamente 41 % mayor que la de la mujer, porque la fuerza de retardo debida a la resistencia del aire es directamente proporcional a la rapidez elevada al cuadrado ($v_{\text{hombre}}^2/v_{\text{mujer}}^2 = 1.41^2 = 2$).



Cuando la fuerza de gravedad y la resistencia del aire actúan sobre un objeto que cae, éste no va en caída libre.

¡EUREKA!

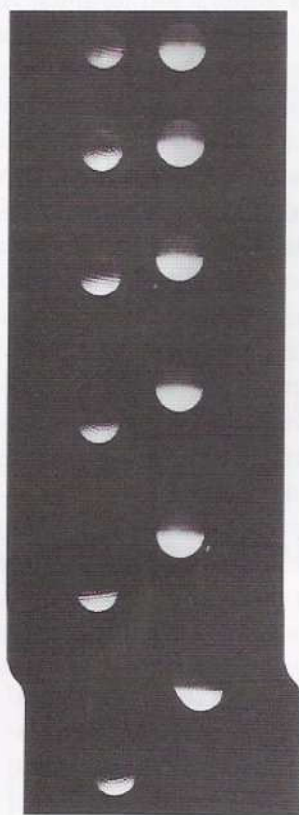


FIGURA 4.16
Fotografía estroboscópica de una pelota de golf (izquierda) y una pelota de poliuretano (derecha) que caen en el aire. La resistencia del aire es despreciable para la pelota más pesada, y su aceleración es aproximadamente igual a g . La resistencia del aire no es despreciable para la pelota ligera de poliuretano, la cual alcanza muy pronto su velocidad terminal.

EXAMÍNAME

Una paracaidista salta desde un helicóptero que vuela muy alto. Al caer cada vez con mayor rapidez por el aire, ¿su aceleración aumenta, disminuye o permanece igual?



Imagínate dos pelotas de tenis, una hueca y la otra rellena con balines de acero. Aunque tienen el mismo tamaño, la que se relleno con balines es bastante más pesada que la otra. Si las sujetas arriba de la cabeza y las dejas caer simultáneamente, verás que llegan al suelo al mismo tiempo. Pero si las dejas caer desde una altura mayor, digamos desde la azotea de un edificio, verás que la pelota más pesada llega al suelo primero. ¿Por qué? En el primer caso, las pelotas no aumentan mucho de rapidez porque su caída es corta. La resistencia aerodinámica con que se encuentran es pequeña, en comparación con sus pesos, aun con la pelota normal. No se percibe la diminuta diferencia en sus momentos de llegada. Sin embargo, cuando se dejan caer desde una altura mayor, las rapidezces de caída mayores se encuentran con mayores resistencias del aire. A igual rapidez cada pelota se encuentra con la misma resistencia del aire porque tienen el mismo tamaño. Esta misma resistencia del aire puede ser mucho mayor en comparación con el peso de la pelota más liviana, pero quizá sea pequeña en comparación con el peso de la pelota más pesada (como los paracaidistas de la figura 4.15). Por ejemplo, 1 N de resistencia del aire que actúa sobre un objeto que pesa 2 N reduce su aceleración a la mitad; pero 1 N de resistencia del aire que actúa sobre un objeto de 200 N sólo disminuye levemente su aceleración. Así, aun cuando las resistencias del aire sean iguales, las aceleraciones de cada cuerpo serían distintas. En este caso la moraleja es: siempre que consideres la aceleración de algo, utiliza la ecuación de la segunda ley de Newton para guiar tu razonamiento. La aceleración es igual al cociente entre la fuerza *neta* y la masa. Para las pelotas de tenis que caen, la fuerza neta sobre la bola hueca se reduce en forma significativa conforme se incrementa la resistencia del aire; en cambio, la fuerza neta sobre la pelota rellena de acero sólo se reduce muy poco. La aceleración disminuye a medida que disminuye la fuerza neta y esa fuerza, a la vez, disminuye al aumentar la resistencia del aire. La resistencia del aire aumentará hasta igualar el peso del objeto que cae, cuando esto suceda la fuerza neta se volverá cero y la aceleración desaparecerá.

COMPRUEBA TU RESPUESTA

La aceleración disminuye porque la fuerza neta sobre ella disminuye. La fuerza neta es igual a su peso menos la resistencia del aire, y como la resistencia del aire aumenta al aumentar su rapidez, la fuerza neta, y en consecuencia la aceleración, disminuyen. De acuerdo con la segunda ley de Newton,

$$a = \frac{F_{\text{net}}}{m} = \frac{mg - R}{m}$$

donde mg es su peso y R es la resistencia del aire que encuentra. Conforme R aumenta, a disminuye. Observa que si cae con la suficiente rapidez para que $R = mg$, entonces $a = 0$ y no hay aceleración; por lo tanto, cae con rapidez constante.

Resumen de términos

Caída libre Movimiento bajo la influencia única de la fuerza de atracción gravitacional.

Fricción Fuerza de resistencia que se opone al movimiento o a intentos de movimiento de un objeto, en relación con otro con el que está en contacto, o a través de un fluido.

Fuerza Influencia que puede causar aceleración en un objeto; se mide en newtons (o en libras en el sistema inglés).

Kilogramo Unidad fundamental de masa en el SI. Un kilogramo (símbolo kg) es equivalente a la masa de 1 litro (L) de agua a 4 °C.

Masa Cantidad de materia en un objeto. En forma más específica, la medida de la inercia u oposición del objeto a cambiar de movimiento en respuesta a los esfuerzos para ponerlo en movimiento, detenerlo, desviarlo o cambiar en cualquier forma su estado de movimiento.

Newton Unidad de fuerza en el SI. Un newton (símbolo N) es la fuerza que produce una aceleración de 1 m/s^2 a un objeto con masa de 1 kg.

Peso Fuerza debida a la gravedad sobre un objeto.

Rapidez terminal Rapidez a que llega un cuerpo que cae cuando la aceleración se hace cero debido a que la resistencia del aire balancea el peso del objeto. Cuando se explicita la dirección hablamos de **velocidad terminal**.

Segunda ley de Newton La aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre éste, está en la dirección de la fuerza neta y es inversamente proporcional a la masa del objeto.

Volumen La cantidad de espacio que ocupa un objeto.

Preguntas de repaso

La fuerza causa aceleración

1. ¿La aceleración es proporcional a la fuerza neta, o es igual a la fuerza neta?

Fricción

2. ¿Cómo influye la fricción sobre la fuerza neta sobre un objeto?
3. ¿Cuál es la magnitud de la fricción, en comparación con tu empuje sobre una caja que no se mueve sobre el suelo horizontal?
4. Si aumentas tu empuje, ¿aumentará también la fricción en la caja?
5. Una vez que la caja se desliza, ¿con qué fuerza debes empujarla para mantenerla en movimiento a velocidad constante?
6. ¿Cuál suele ser mayor, la fricción estática o la fricción cinética sobre el mismo objeto?
7. ¿Cómo varía la fuerza de fricción cuando varía la rapidez?

8. Desliza un bloque sobre su lado más grande, y a continuación voltea de manera que se deslice sobre su lado más pequeño. ¿En qué caso la fricción es mayor?
9. ¿Varía la fricción en los fluidos con la rapidez y con el área de contacto?

Masa y peso

10. ¿Qué relación tiene la masa con la inercia?
11. ¿Qué relación tiene la masa con el peso?
12. ¿Qué es más fundamental, la *masa* o el *peso*? ¿Cuál varía con el lugar?
13. Llena los espacios: Cuando se agita un cuerpo, se mide su _____. Cuando ese cuerpo se levanta contra la gravedad, se está midiendo su _____.
14. Llena los espacios: La unidad internacional (SI) de masa es _____. La unidad internacional de fuerza es _____.
15. ¿Cuál es el peso aproximado de una hamburguesa de un cuarto de libra ya cocinada?
16. ¿Cuál es el peso de un ladrillo de 1 kilogramo?
17. En los tirones del cordel de la figura 4.8, uno gradual en la parte inferior hace que se rompa el cordel superior. Ese fenómeno, ¿está relacionado con el peso o la masa de la esfera?
18. En los tirones del cordel de la figura 4.8, un tirón brusco en la parte inferior hace que se rompa el cordel inferior. Ese fenómeno, ¿ilustra el peso o la masa de la esfera?
19. Explica con claridad la diferencia entre *masa*, *peso* y *volumen*.

Una masa se resiste a acelerar

20. ¿La aceleración es *directamente* proporcional a la masa, o es *inversamente* proporcional a la masa? Da un ejemplo.

Segunda ley de Newton del movimiento

21. Enuncia la segunda ley de Newton del movimiento.
22. Si se dice que una cantidad es *directamente proporcional* a otra. ¿Quiere decir que son *iguales* entre sí? Explícalo en forma breve, usando masa y peso en un ejemplo.
23. Si la fuerza neta que actúa sobre un bloque que se desliza aumenta al triple, ¿cuánto aumentará su aceleración?
24. Si la masa de un bloque que se desliza aumenta al triple, mientras se le aplica una fuerza neta constante, ¿cuánto disminuye la aceleración?
25. Si la masa de un bloque que se desliza aumenta al triple y al mismo tiempo la fuerza neta aumenta al triple, ¿cómo se compara la aceleración que resulta con la aceleración original?
26. ¿Cómo se compara la dirección de la aceleración con la de la fuerza neta que la produce?

Cuando la aceleración es g (caída libre)

27. ¿Qué quiere decir *caída libre*?
28. La relación circunferencia/diámetro es π en todos los círculos. ¿Cuál es la relación fuerza/masa en todos los objetos que caen libremente?
29. ¿Por qué un objeto pesado no acelera más que uno ligero, cuando ambos caen libremente?

Cuando la aceleración es menor que g (caída no libre)

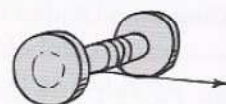
30. ¿Cuál es la fuerza neta que actúa sobre un objeto de 10 N en caída libre?
31. ¿Cuál es la fuerza neta que actúa sobre un objeto de 10 N cuando al caer se encuentra con una resistencia del aire igual a 4 N? ¿Y si encuentra una resistencia del aire de 10 N?
32. ¿Cuáles son los dos factores principales que afectan la fuerza de resistencia del aire sobre un objeto que cae?
33. ¿Cuál es la aceleración de un objeto que cae y ha llegado a su velocidad terminal?
34. ¿Por qué un paracaidista pesado cae con mayor rapidez que uno más ligero, si los dos usan paracaídas del mismo tamaño?
35. Si dos objetos del mismo tamaño caen por el aire con distintas rapidez, ¿cuál encuentra la mayor resistencia del aire?

Proyectos

1. Escribe una carta a tu abuelita, parecida a la del proyecto 1 del capítulo 3. Cuéntale que Galileo introdujo los conceptos de aceleración e inercia, y que estaba familiarizado con las fuerzas, pero que no consideró ninguna relación entre los tres conceptos. Dile cómo Isaac Newton en verdad percibió tales conexiones y cómo éstas explican por qué los objetos pesados y ligeros que caen libremente tienen la misma rapidez en el mismo tiempo. En la carta, está bien que uses una ecuación o dos, según consideres que le ayudará a tu abuelita a tener claro que una ecuación es una notación abreviada de las ideas que le estás explicando.
2. Deja caer una hoja de papel y una moneda al mismo tiempo. ¿Cuál llega primero al suelo? ¿Por qué? Ahora haz una bola con la hoja de papel y déjala caer de nuevo con la moneda. Describe la diferencia que observes. ¿Caerían igual si se dejaran caer desde la ventana de un segundo, un tercer o un cuarto pisos? Intentalo y describe tus observaciones.
3. Deja caer un libro y una hoja de papel, y observa que el libro tiene mayor aceleración (g). Coloca el papel bajo el libro, de manera que sea impulsado por éste cuando ambos caen, por lo que ambos caen con g . ¿Cómo se comparan sus aceleraciones si colocas el papel sobre el libro levantado y luego dejas caer am-

bos? Te sorprenderá, así que haz la prueba y observa. A continuación explica tu observación.

4. Deja caer dos pelotas con distintos pesos desde la misma altura. Cuando sus rapidez son pequeñas, caen prácticamente juntas. ¿Rodarán igual por el mismo plano inclinado? Si cada una se cuelga de un hilo con igual longitud, formando un par de péndulos y soltándolas desde el mismo ángulo, ¿oscilarán al unísono? Prueba y observa; a continuación explícalo usando las leyes de Newton.
5. La fuerza neta que actúa sobre un objeto, y la aceleración que resulta, siempre tienen la misma dirección. Lo puedes demostrar con un carrete. Si tiras del carrete horizontalmente hacia la derecha, ¿en qué dirección rodará?

**Cálculos de un paso**

Realiza estos sencillos cálculos de un paso y familiarízate con las ecuaciones que relacionan los conceptos de fuerza, masa y aceleración.

$$\text{Peso} = mg$$

1. Calcula el peso en newtons de una persona que tenga una masa de 50 kg.
2. Calcula el peso en newtons de un elefante de 2,000 kg.
3. Calcula el peso en newtons de un melón de 2.5 kg. ¿Cuál es su peso en libras?
4. Una manzana pesa aproximadamente 1 N. ¿Cuál es su masa en kilogramos? ¿Cuál es su peso en libras?
5. Susie Small tiene un peso de 300 N. Calcula su masa.

$$\text{Aceleración: } a = F_{\text{net}}/m$$

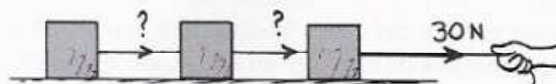
6. Calcula la aceleración de una avioneta de 2,000 kg, con un solo motor, justo antes de despegar, si el empuje de su motor es de 500 N.
7. Calcula la aceleración de un avión jumbo de 300,000 kg justo antes de despegar, si el empuje sobre el avión es de 120,000 N.
8. a) Calcula la aceleración de un bloque de 2 kg sobre una superficie horizontal, sin fricción, cuando ejerces una fuerza horizontal neta de 20 N. b) ¿Cuál es la aceleración que ocurre si la fuerza de fricción es de 4 N?

$$\text{Fuerza} = ma$$

9. Calcula la fuerza horizontal que debe aplicarse a un disco de hockey (*puck*) de 1 kg, para hacer que su aceleración sobre una superficie horizontal, sin fricción, sea la misma que tendría si se dejara caer libremente.
10. Calcula la fuerza horizontal que debe aplicarse para producir una aceleración de 1.8 g en un disco de hockey de 1.2 kg, que se encuentra sobre una superficie horizontal, sin fricción.

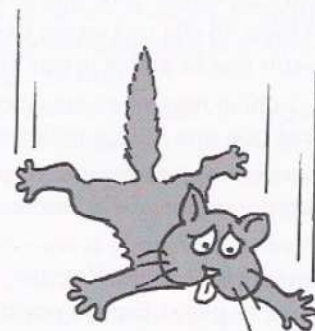
Ejercicios

1. ¿La velocidad de un objeto puede invertir su dirección mientras mantiene aceleración constante? En caso afirmativo, menciona un ejemplo. Si no, explica por qué.
2. En una pista larga, una bola de bolos se desacelera cuando rueda. ¿Está actuando alguna fuerza horizontal sobre ella? ¿Cómo lo sabes?
3. ¿Es posible describir una curva en ausencia de una fuerza? Sustenta tu respuesta.
4. Un astronauta lanza una piedra sobre la Luna. ¿Qué fuerza(s) actúa(n) sobre la piedra durante su trayectoria curva?
5. Como un objeto pesa menos en la superficie de la Luna que en la superficie de la Tierra, ¿tendrá menos inercia en la superficie de la Luna?
6. ¿Qué contiene más manzanas, una bolsa de 1 libra de ellas en la Tierra o una bolsa de 1 libra de ellas en la Luna? ¿Qué contiene más manzanas, una bolsa de 1 kilogramo de ellas en la Tierra o una bolsa de 1 kilogramo de ellas en la Luna?
7. Un oso de 400 kg se desliza hacia abajo por el tronco de un árbol del cual se agarra, con velocidad constante. ¿Cuál es la fuerza de fricción que actúa sobre el oso?
8. Una caja permanece en reposo en el suelo de una fábrica, cuando la empujas con una fuerza horizontal F . ¿De qué magnitud es la fuerza de fricción que ejerce el suelo sobre la caja? Explica por qué.
9. Estando en órbita el transbordador espacial, en su interior te dan dos cajas idénticas: una está llena de arena y la otra está llena de plumas. ¿Cómo puedes saber cuál es cuál, sin abrirlas?
10. Tu mano vacía no se lesiona cuando la golpeas con suavidad contra un muro. ¿Por qué se lesionaría si lo hicieras sujetando en ella una carga pesada? ¿Cuál es la ley de Newton que se aplica mejor aquí?
11. ¿Por qué un cuchillo masivo es más efectivo para cortar verduras que una navaja igualmente afilada?
12. ¿La masa de un astronauta cambia cuando visita la estación espacial internacional? Sustenta tu respuesta.
13. Cuando a un vehículo viejo se le transforma en chatarra y se compacta en forma de cubo, ¿cambia su masa? ¿Cambia su peso? Explica por qué.
14. La gravedad en la superficie de la Luna sólo es la sexta parte que sobre la Tierra. ¿Cuál es el peso de un objeto de 10 kg sobre la Luna y sobre la Tierra? ¿Cuál es su masa en cada lugar?
15. Qué es más correcto decir de una persona que sigue una dieta, ¿qué está perdiendo masa o que está perdiendo peso?
16. ¿Qué sucede a tu peso cuando aumenta tu masa?
17. ¿Cuál es tu masa en kilogramos? ¿Cuál es tu peso en newtons?
18. Una bolsa del supermercado puede resistir 300 N de fuerza antes de romperse. ¿Cuántos kilogramos de manzanas puede llevar seguramente?
19. Considera una caja pesada que está en reposo en la superficie de la cama plana de un camión. Cuando éste acelera, la caja también acelera y permanece en su sitio. Identifica la fuerza que acelera la caja.
20. Explica cómo la primera ley de Newton del movimiento se puede considerar una consecuencia de la segunda ley de Newton.
21. Es cada vez más fácil acelerar un cohete conforme viaja a través del espacio. ¿Por qué? (Sugerencia: aproximadamente 90% de la masa de un cohete recién disparado es combustible.)
22. ¿Qué necesita menos combustible, lanzar un cohete desde la Luna o desde la Tierra? Sustenta tu respuesta.
23. Aristóteles afirmaba que la rapidez de un cuerpo que cae depende de su peso. Hoy sabemos que los objetos en caída libre, independientemente de su peso, tienen el mismo aumento de rapidez. ¿Por qué el peso no afecta la aceleración?
24. En el bloqueo del fútbol americano, un liniero defensivo con frecuencia trata que su cuerpo esté más abajo que el del contrario, para empujarlo hacia arriba. ¿Qué efecto tiene eso sobre la fuerza de fricción entre los pies del liniero contrario y el terreno?
25. Un auto de carreras viaja por una pista a velocidad constante de 200 km/h. ¿Qué fuerzas horizontales actúan sobre él y cuál es la fuerza neta que actúa sobre él?
26. Para tirar de un carro por un prado, con velocidad constante, debes ejercer una fuerza constante. Relaciona esto con la primera ley de Newton, que dice que el movimiento con velocidad constante no requiere fuerza.
27. Tres bloques idénticos son arrastrados como se muestra en la figura, sobre una superficie horizontal sin fricción. Si la tensión en la cuerda que la mano sujeta es 30 N, ¿cuál será la tensión en las demás cuerdas?



28. La caída libre es el movimiento en el que la gravedad es la única fuerza que actúa. a) ¿Un paracaidista que ha llegado a su rapidez terminal está en caída libre? b) ¿Un satélite que describe círculos en torno a la Tierra está en caída libre?

29. Cuando una moneda se lanza hacia arriba, ¿qué sucede con su velocidad mientras asciende? ¿Es aceleración? (No tomes en cuenta la resistencia del aire.)
30. ¿Cuánta fuerza actúa sobre una moneda lanzada cuando está a la mitad del camino de su altura máxima? ¿Cuánta fuerza actúa sobre ella cuando alcanza su altura máxima? (No tomes en cuenta la resistencia del aire.)
31. Traza la trayectoria de una pelota lanzada verticalmente. (No tomes en cuenta la resistencia del aire.) Dibuja la pelota a la mitad del camino hacia su altura máxima, en su altura máxima y a la mitad del camino cuando baja hacia el origen. Traza un vector de fuerza en la pelota para las tres posiciones. ¿El vector es el mismo o es diferente en las tres posiciones? ¿La aceleración es la misma o diferente en las tres posiciones?
32. Al brincar hacia arriba, en posición erguida, ¿cómo se comparan la fuerza que ejerces sobre el suelo y tu peso?
33. Cuando saltas verticalmente del suelo, ¿cuál es tu aceleración cuando llegas a tu punto más alto?
34. ¿Cuál es la aceleración de una piedra en la cúspide de su trayectoria, cuando se lanza directo hacia arriba? ¿Tu respuesta coincide con la segunda ley de Newton?
35. Un refrán dice: "No es la caída la que duele, es la parada tan repentina." Traduce lo anterior en términos de las leyes de Newton del movimiento.
36. Un amigo te dice que mientras un automóvil está en reposo no actúa fuerzas sobre él. ¿Qué le dirías al respecto para corregirlo?
37. Cuando tu automóvil avanza por la carretera con velocidad constante, la fuerza neta sobre él es cero. ¿Por qué entonces debes mantener el motor funcionando?
38. Una "estrella fugaz" suele ser un grano de arena procedente del espacio, que se quema y emite luz al entrar a la atmósfera. ¿Qué es exactamente lo que causa que se queme?
39. ¿Cuál es la fuerza neta sobre una manzana de 1 N, cuando la sujetas en reposo por encima de tu cabeza? ¿Cuál es la fuerza neta después de que la sueltas?
40. ¿Un cartucho de dinamita contiene fuerzas?
41. Un paracaidista, después de abrir el paracaídas, baja suavemente y no aumenta su rapidez. Sin embargo, siente el tirón del arnés hacia arriba, mientras que la gravedad tira de él hacia abajo. ¿Cuál de las dos fuerzas es mayor? ¿O tendrán la misma magnitud?
42. ¿Un objeto que cae aumenta de rapidez si disminuye su aceleración de caída?
43. ¿Cuál es la fuerza neta que actúa sobre una esfera de 1 kg en caída libre?
44. ¿Cuál es la fuerza neta que actúa sobre una esfera de 1 kg que cae, si ésta encuentra una resistencia del aire de 2 N?
45. Un amigo te dice que antes de que la esfera del ejercicio anterior alcance su velocidad terminal, *incrementa* su rapidez conforme *disminuye* su aceleración. ¿Estás de acuerdo o no con este amigo? Sustenta tu respuesta.
46. ¿Por qué una hoja de papel caerá más despacio que otra que se ha hecho en forma de bola?
47. ¿La resistencia del aire, será mayor sobre una hoja de papel que cae, o sobre el mismo papel hecho una bola, la cual cae con una rapidez terminal mayor? (¡Ten cuidado!)
48. Con una mano sujeta una pelota de ping-pong y con la otra una pelota de golf. Suéltalas al mismo tiempo. Verás que caen al suelo casi al mismo tiempo. Pero si las dejas caer desde la cima de una escalera alta, verás que la de golf llega primero. ¿Cómo explicas lo sucedido?
49. ¿Cómo se compara la fuerza de gravedad sobre una gota de lluvia con la resistencia del aire que se encuentra en su caída, cuando la gota cae a velocidad constante?
50. Cuando un automóvil se mueve en reversa, al regresar por un camino y el conductor frena. ¿En qué dirección va la aceleración del carro?
51. Cuando un paracaidista abre el paracaídas, ¿en qué dirección acelera?
52. ¿Cómo se comparan la rapidez terminal de un paracaidista, antes de abrir el paracaídas, con su velocidad terminal después de abrirlo? ¿A qué se debe la diferencia?
53. ¿Cómo se compara la fuerza gravitacional sobre un cuerpo que cae con la resistencia del aire que encuentra antes de llegar a la velocidad terminal? ¿Y después de llegar a ella?
54. ¿Por qué un gato que por accidente cae desde la azotea de un edificio de 50 pisos, llega al suelo con la misma rapidez que si el edificio tuviera 20 pisos?



55. ¿Bajo qué condiciones estará en equilibrio una esfera de metal que cae en un líquido viscoso?
56. Cuando Galileo dejaba caer las dos pelotas desde lo alto de la Torre Inclinada de Pisa, la resistencia del aire no era despreciable. Suponiendo que ambas tuvieran el mismo tamaño pero una fuera de madera y la otra de metal, ¿cuál de ellas llegaría primero al suelo? ¿Por qué?

57. Si dejas caer un par de pelotas de tenis, al mismo tiempo, desde la azotea de un edificio, llegarán al suelo al mismo tiempo. Si rellenas una de ellas con balines de plomo y las dejas caer al mismo tiempo, ¿cuál llegará primero al suelo? ¿Cuál tendrá mayor resistencia del aire? Sustenta tus respuestas.
58. Cuando no hay resistencia del aire, si una pelota se lanza verticalmente hacia arriba, con cierta rapidez inicial, al regresar a su altura original tendrá la misma rapidez. Cuando se tienen en cuenta la resistencia del aire, ¿la pelota se moverá más rápido, igual o más lento cuando regrese al mismo nivel? ¿Por qué? (Con frecuencia, los físicos usan un "principio de exageración" para ayudarse a analizar un problema. Examina el caso exagerado de una pluma, y no de una pelota, porque el efecto de la resistencia del aire sobre la pluma es más pronunciado y en consecuencia es más fácil de visualizar.)
59. Si una pelota se lanza verticalmente al aire en presencia de la resistencia de éste, ¿crees que el tiempo durante el cual sube será más largo o más corto que su tiempo de bajada? (Aplica de nuevo el "principio de la exageración".)
60. Para comprobar el aprendizaje de un compañero de clase sobre la diferencia entre masa y peso, ¿qué le preguntarías usando dos preguntas de opción múltiple?
5. ¿Cuánta aceleración tiene un Jumbo 747 con 30,000 kg de masa, al despegar, cuando el empuje de cada uno de sus cuatro motores es 30,000 N?
6. Se ve que dos cajas aceleran igual cuando se aplica una fuerza F a la primera, y se aplica $4F$ a la segunda. ¿Cuál es la relación de sus masas?
7. Un bombero de 80 kg de masa se desliza por un poste vertical con una aceleración de 4 m/s^2 . ¿Cuál es la fuerza de fricción entre el poste y el bombero?
8. ¿Cuál será la aceleración de un paracaidista cuando aumenta la resistencia del aire hasta la mitad de su peso?
9. Al acelerar cerca del final de una carrera, un corredor de 60 kg de masa pasa de una rapidez de 6 m/s a otra de 7 m/s en 2 s. a) ¿Cuál es la aceleración promedio del corredor durante este tiempo? b) Para aumentar su rapidez, el corredor produce una fuerza sobre el suelo dirigida hacia atrás, y en consecuencia el suelo lo impulsa hacia adelante y proporciona la fuerza necesaria para la aceleración. Calcula esta fuerza promedio.
10. Antes de entrar en órbita, una astronauta tiene 55 kg de masa. Al estar en órbita, con una medición se determina que una fuerza de 100 N hace que se mueva con una aceleración de 1.90 m/s^2 . Para recobrar su peso inicial, ¿debería ponerse a dieta, o comenzar a comer más chocolates?

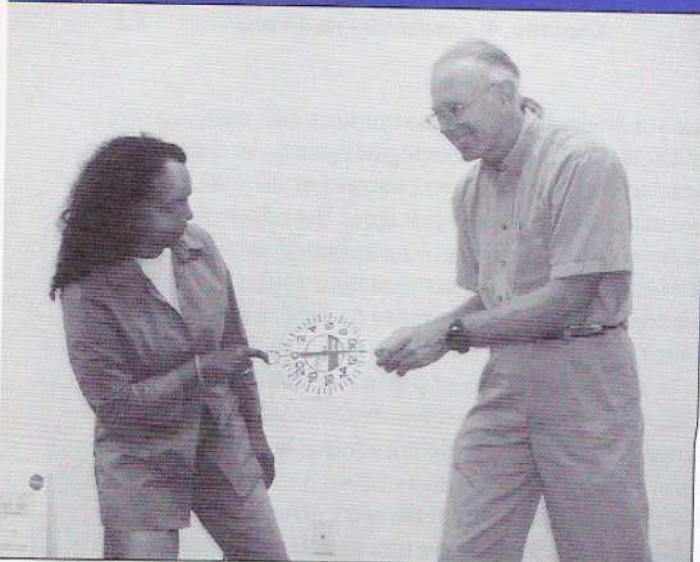
Problemas

1. ¿Cuál es la aceleración máxima que puede adquirir un corredor, si la fricción entre los pies y el pavimento es del 90% de su peso?
2. ¿Cuál es la aceleración de un bloque de cemento de 40 kg, al tirar de él lateralmente con una fuerza neta de 200 N?
3. ¿Cuál es la aceleración de una cubeta con 20 kg de cemento de la cual se tira hacia arriba (¡no lateralmente!) con una fuerza de 300 N?
4. Si una fuerza de 1 N acelera una masa de 1 kg con 1 m/s^2 , ¿cuál será la aceleración de 2 kg sobre los cuales obre una fuerza de 2 N?

Recuerda: las preguntas de repaso te ofrecen una autoevaluación respecto de si aprendiste o no las ideas centrales del capítulo. Los ejercicios y problemas son un "impulso" extra, para que los resuelvas después de tener al menos un entendimiento modesto del capítulo y puedas manejar las preguntas de repaso.



Tercera ley de Newton del movimiento



Darlene Librero jala con un dedo; Paul Doherty jala con ambas manos. La pregunta que ellos hacen en su clase de física es "¿quién ejerce más fuerza sobre la báscula?"

D deja caer una hoja de pañuelo desechable frente al campeón mundial de boxeo de peso completo y rétaló a que la golpee cuando está en el aire, aunque sea con una fuerza de 50 libras (222 N). Discúlpalo, el campeón no lo podrá hacer. De hecho, ni siquiera su mejor golpe podría acercarse a esa cantidad. ¿Por qué? En este capítulo veremos que el pañuelo desechable no tiene la inercia suficiente como para tener una interacción de 50 libras con el puño del campeón.

Fuerzas e interacciones

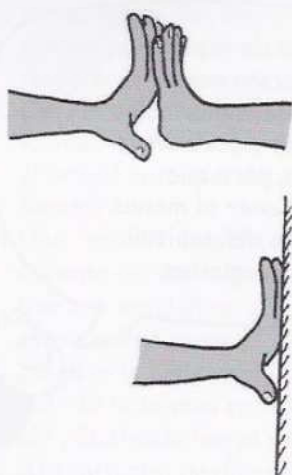


FIGURA 5.1

Figura interactiva

Puedes sentir que tus dedos son empujados por los dedos de tu amigo. También sientes la misma cantidad de fuerza cuando empujas una pared y ésta te empuja. Entonces no puedes empujar la pared, ¡a menos que ésta también te empuje a ti!

Hasta aquí hemos estudiado la fuerza en su sentido más sencillo: como un empuje o un tirón. Sin embargo, ni el empuje ni el tirón ocurren aislados. Cada fuerza es parte de una *interacción* entre una cosa y otra. Si empujas una pared con los dedos sucede algo más que eso. Estás interactuando con la pared, la cual también te empuja. Esto se nota cuando tus dedos se flexionan, como en la figura 5.1.

De manera que interviene un par de fuerzas: tu empuje sobre el muro y el empuje que te devuelve el muro. Estas fuerzas son de igual magnitud (tienen el mismo valor) y dirección contraria, y forman una interacción simple. De hecho no puedes empujar la pared *a menos* que ésta te regrese el empujón.¹

Considera a un boxeador que golpea un saco de arena. Su puño golpea el saco de arena (y lo deforma), y al mismo tiempo el saco pega contra el puño (y detiene su movimiento). Al golpear el saco de arena interviene un par de fuerzas. El par de fuerzas puede ser muy grande. Pero, ¿y si quiere golpear una hoja de pañuelo desechable, como se dijo antes? El puño del boxeador sólo ejercería una fuerza sobre el papel que iguale la fuerza que el papel ejerce sobre el puño. Es decir, el puño no puede ejercer fuerza alguna, a menos que aquello a lo que pegue le devuelva la misma cantidad de fuerza. Una interacción requiere de un *par* de fuerzas que actúen sobre *dos* objetos distintos.

Otros ejemplos: Tiras de un carrito y éste acelera. Pero al hacerlo el carrito tira de ti, como quizá lo puedas sentir si te envuelves la mano con la cuerda tensada. Un martillo le pega a una estaca y la mete en el suelo.

¹ Tendemos a imaginar que sólo lo viviente empuja y jala. Pero las cosas inanimada pueden hacer lo mismo. Así que no tengas problema con la idea de que algo inanimado te empuja. Lo hace, del mismo modo que lo haría otra persona que se recargara contra ti.



FIGURA 5.2

Cuando te recargas contra una pared, ejerces sobre ella una fuerza. Al mismo tiempo, la pared ejerce una fuerza igual y opuesta sobre ti. Por ello no te caes.

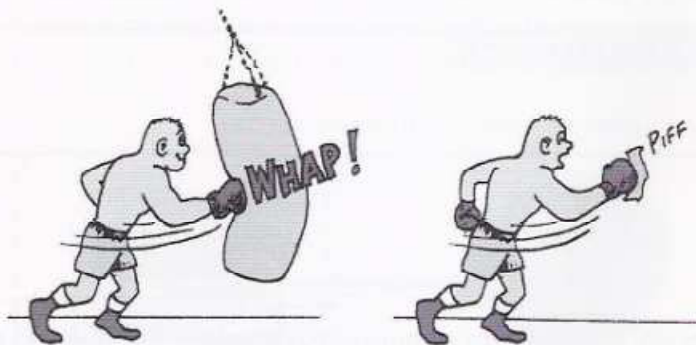


FIGURA 5.3

El boxeador puede golpear el saco de arena con gran fuerza, pero con el mismo golpe sólo puede ejercer una fuerza diminuta sobre el pañuelo desechable en el aire.

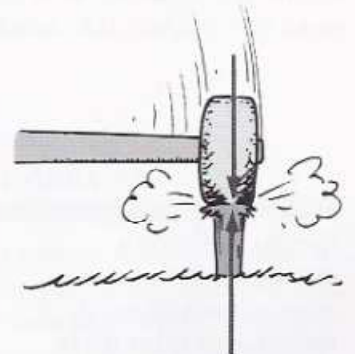


FIGURA 5.4

En la interacción entre el martillo y la estaca, cada uno ejerce la misma fuerza sobre el otro.

THE Physics Place

Fuerzas e interacciones

Tercera ley de Newton del movimiento

La tercera ley de Newton establece:

Siempre que un objeto ejerce una fuerza sobre un segundo objeto, el segundo objeto ejerce una fuerza de igual magnitud y dirección opuesta sobre el primero.

Entonces podemos identificar una *fuerza de acción* y una *fuerza de reacción*, y expresar la tercera ley de Newton como sigue:

A cada acción siempre se opone una reacción igual.

No importa cuál fuerza sea la de acción y cuál la de reacción. Lo que interesa es que constituyen una sola interacción y que ninguna fuerza existe sin la otra.

Tú interactúas con el piso al caminar sobre él. Tu empuje contra el piso se acopla al empuje del piso contra ti. El par de fuerzas se forma al mismo tiempo (son *simultáneas*). De igual manera, los neumáticos y el asfalto se empujan entre sí. Al nadar interactúas con el agua, la cual empujas hacia atrás, mientras que el agua te empuja hacia delante al mismo tiempo; y tú y el agua se empujan entre sí. En estos casos, las fuerzas de reacción son las que causan el movimiento. Esas fuerzas dependen de la fricción: una persona o un automóvil en el hielo, por ejemplo, podrían no llegar a ejercer la fuerza de acción que produzca la fuerza de reacción necesaria. Ninguna fuerza existe sin la otra.



Presiona tus dedos entre sí y notarás que, conforme presionas más fuerte, ambos pierden color con igual intensidad. ¡Ajá, ambos experimentan una fuerza de igual magnitud!

¡EUREKA!

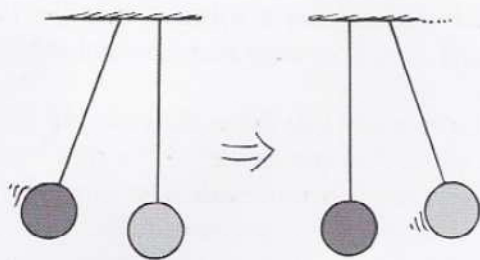


FIGURA 5.5

Las fuerzas de impacto entre las esferas de la izquierda y de la derecha mueven una y detienen la otra.



FIGURA 5.6

En la interacción entre el automóvil y el camión, ¿la fuerza de impacto es la misma en cada uno?

EXAMÍNATE

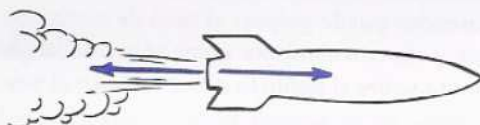
¿Un misil en movimiento posee fuerza?

FIGURA 5.7

Fuerzas de acción y reacción. Observa que cuando la acción es "A ejerce fuerza sobre B", la reacción es simplemente "B ejerce fuerza sobre A".



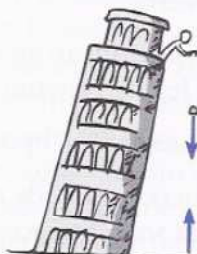
Acción: el neumático empuja el pavimento Reacción: el pavimento empuja el neumático



Acción: el cohete empuja los gases Reacción: los gases empujan el cohete



Acción: el hombre tira de un resorte Reacción: el resorte tira del hombre



Acción: la Tierra tira de la pelota

Reacción: la pelota tira de la Tierra

COMPRUEBA TU RESPUESTA

No, una fuerza no es algo que un objeto *tenga*, como masa; pero es parte de una interacción entre dos objetos. Un misil en movimiento tiene la capacidad de ejercer una fuerza sobre otro objeto, cuando sucede la interacción, pero no posee fuerza en sí mismo. Como veremos en los siguientes capítulos, un misil en movimiento tiene cantidad de movimiento y energía cinética.

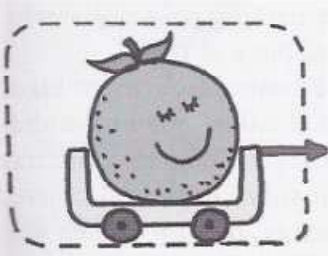


FIGURA 5.8

Figura interactiva

Una fuerza actúa sobre la naranja, y la naranja acelera hacia la derecha.

Definición de tu sistema

Con frecuencia surge una interesante pregunta: si las fuerzas de acción y de reacción son iguales en magnitud y opuestas en dirección, ¿por qué no se anulan? Para contestarla debemos definir el *sistema* que interviene. Considera, por ejemplo, un sistema que consiste de una sola naranja, como el de la figura 5.8. La línea punteada que rodea la naranja encierra y define el sistema. El vector que apunta hacia fuera de la línea punteada representa una fuerza externa al sistema. El sistema acelera de acuerdo con la segunda ley de Newton. En la figura 5.9 vemos que esta fuerza es proporcionada por una manzana, la cual no altera nuestro análisis. La manzana es externa al sistema. El hecho de que la naranja ejerza al mismo tiempo una fuerza sobre la manzana, que es externa al otro sistema, puede afectar a la manzana (el otro sistema), pero no a la naranja. La fuerza sobre la naranja no se anula con la fuerza sobre la manzana. Así que, en este caso, las fuerzas de acción y de reacción no se anulan.

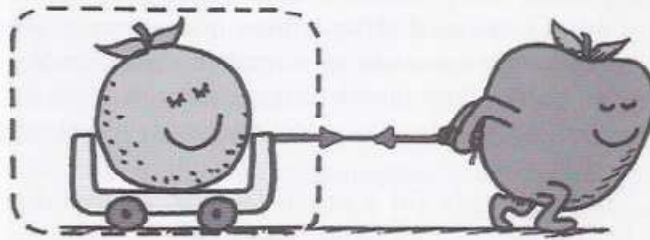


FIGURA 5.9

Figura interactiva

La fuerza sobre la naranja, la proporciona la manzana, ésta no se anula por la fuerza de reacción sobre la manzana; así que la naranja acelera.



Un sistema puede ser tan diminuto como un átomo, o tan inmenso como el Universo.

¡EUREKA!

Consideremos ahora un sistema más grande, que abarque *tanto* a la naranja como a la manzana. Observamos que el sistema está rodeado por una línea punteada de la figura 5.10. Note que el par de fuerzas es *interno* al sistema naranja-manzana. Entonces, las fuerzas *sí* se anulan entre sí. No juegan ningún papel en la aceleración del sistema. Se requiere una fuerza externa al sistema para lograr aceleración. Es donde se presenta la fricción con el piso (figura 5.11). Cuando la manzana empuja contra el piso, éste simultáneamente empuja contra la manzana: una fuerza externa al sistema. Entonces, el sistema acelera hacia la derecha.

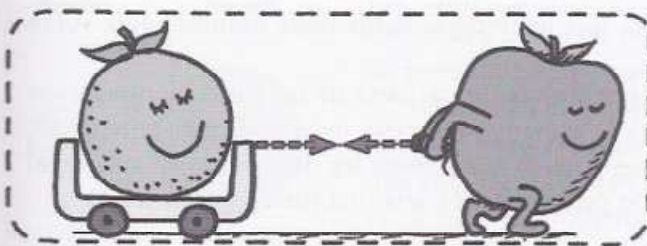


FIGURA 5.10

Figura interactiva

En el sistema más grande de naranja + manzana, las fuerzas de acción y de reacción son internas y se anulan. Como éstas son sólo las fuerzas horizontales, sin fuerza externa, no hay aceleración del sistema.

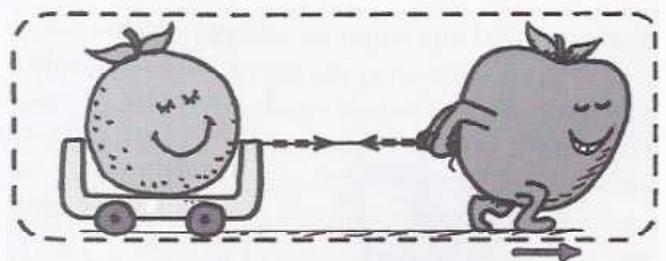


FIGURA 5.11

Figura interactiva

Una fuerza horizontal externa ocurre cuando el piso empuja sobre la manzana (la reacción al empuje de la manzana sobre el piso). El sistema naranja-manzana acelera.

Dentro de un balón de fútbol americano hay billones y billones de fuerzas interatómicas en juego, que lo mantienen unido; pero no son responsables de acelerarlo. Aunque cada una de las fuerzas interatómicas forma parte de un par acción-reacción dentro del balón, al combinarse dan cero, sin importar cuántas

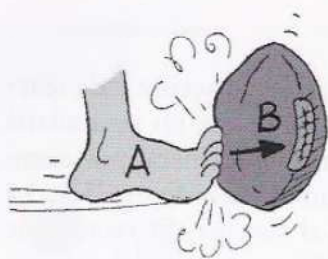


FIGURA 5.12

A actúa sobre B, y B acelera.

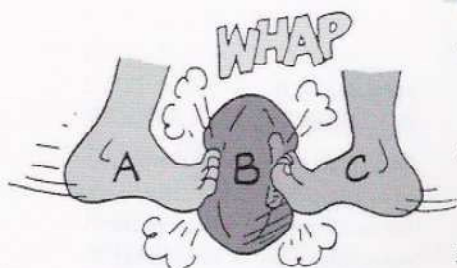


FIGURA 5.13

Tanto A como C actúan sobre B. Es posible que se anule entre sí, de manera que B no acelere.



No puedes empujar o jalar algo a menos que ese algo, simultáneamente, empuje sobre ti o te jale. ¡Ésa es la tercera ley!

¡EUREKA!

sean. Se necesita una fuerza externa al balón, como una patada, para acelerarlo. En la figura 5.12 se observa una sola interacción entre el pie y el balón.

Sin embargo, el balón de la figura 5.13 no acelera. En este caso, tienen lugar dos interacciones, es decir, dos fuerzas que actúan sobre el balón. Si son simultáneas, iguales y opuestas, entonces la fuerza neta será cero. ¿Las patadas opuestas constituyen un par acción-reacción? No, porque actúan sobre el mismo objeto, no sobre diferentes objetos. Tal vez sean iguales y opuestas, pero, a menos que actúen sobre diferentes objetos, no constituyen un par acción-reacción. ¿Lo comprendes?

Si esto resulta confuso, sería pertinente destacar que el mismo Newton tuvo dificultades con su tercera ley. (Hay algunos ejemplos ilustrativos de la tercera ley de Newton en las páginas 21 y 22 en el *Libro de práctica de desarrollo de conceptos*.)

EXAMÍNA TE

1. En un día frío y lluvioso el acumulador (batería) de tu automóvil está "muerto", y debes empujar el vehículo para que arranque. ¿Porqué no puedes empujar cómodamente sentado en el interior y empujando contra el tablero?
2. ¿Por qué un libro que descansa sobre una mesa nunca acelera "espontáneamente" como respuesta a los billones de fuerza interatómicas que actúan dentro de él?
3. Sabemos que la Tierra tira de la Luna. ¿Quiere decir que en consecuencia la Luna también tirará de la Tierra?
4. ¿Puedes identificar las fuerzas de acción y de reacción en el caso de un objeto que cae en el vacío?

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. En este caso, el sistema que se debe acelerar es el automóvil. Si te quedas en el interior y empujas el tablero, el par de fuerzas que produces son de acción y reacción dentro del sistema. Estas fuerzas se anulan en lo que concierne al movimiento del vehículo. Para acelerarlo debe haber una interacción entre él y algo externo a él; por ejemplo, que lo empujes desde fuera impulsándote sobre el piso de la calle.
2. Cada una de esas fuerzas interatómicas forma parte de un par acción-reacción dentro del libro. Estas fuerzas se suman y dan cero, independientemente de lo numerosas que sean. Es lo que hace que la *primera* ley de Newton se aplique al libro. El libro tiene aceleración cero, a menos que una fuerza *externa* actúe sobre él.
3. Sí, ambas fuerzas forman un par de fuerzas acción-reacción, asociado con la interacción gravitacional entre la Tierra y la Luna. Se puede decir que 1. la Tierra tira de la Luna, y 2. la Luna tira también de la Tierra; pero es mejor imaginar que sólo se trata de una sola interacción: que la Tierra y la Luna tiran simultáneamente entre sí, cada una con la *misma* cantidad de fuerza.
4. Para identificar en cualquier caso un par de fuerzas de acción-reacción, primero se identifica el par de los objetos que interactúan: el cuerpo A y el cuerpo B. El cuerpo A, el objeto que cae, interactúa (gravitacionalmente) con el cuerpo B, que es toda la Tierra. Entonces, la Tierra tira hacia abajo del objeto (lo llamaremos acción), mientras que el objeto tira hacia arriba de la Tierra (reacción).

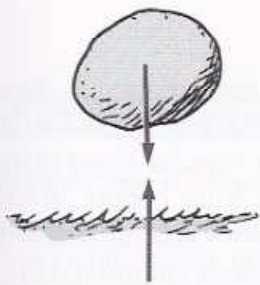


FIGURA 5.14

La Tierra es tirada hacia arriba por la piedra, con igual fuerza que la piedra es tirada hacia abajo por la Tierra.



Acción y reacción sobre masas diferentes
Acción y reacción sobre el rifle y la bala

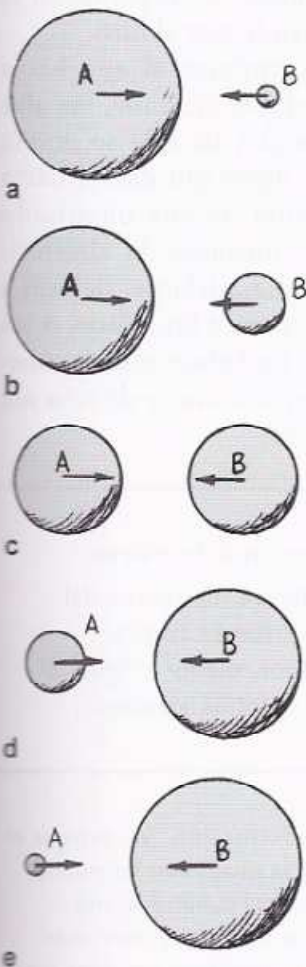


FIGURA 5.15

¿Cuál cae hacia cuál, A o B?
¿Las aceleraciones de cada una se relacionan con sus masas relativas?

Acción y reacción sobre masas distintas

Por extraño que te parezca, un objeto que cae tira de la Tierra hacia arriba, tanto como la Tierra tira de él hacia abajo. La aceleración resultante del objeto que cae es evidente; en tanto que la aceleración de la Tierra hacia arriba es demasiado pequeña para detectarse. Estrictamente hablando, cuando te bajas de la acera a la calle, ésta siempre se eleva para encontrarse contigo.

Podemos ver que la Tierra acelera una mínima parte como respuesta a un objeto que cae, si examinamos los ejemplos exagerados de dos cuerpos planetarios, de *a* hacia *e* en la figura 5.15. Las fuerzas entre A y B son de igual magnitud y dirección opuesta en *cada* caso. Si la aceleración del planeta A no se nota en la parte *a*, entonces se nota más en *b*, donde la diferencia entre las masas es menos extrema. En *c*, donde ambos cuerpos tienen igual masa, la aceleración del objeto A es evidente, al igual que la de B. Continuando, vemos que la aceleración de A se hace cada vez más evidente en la parte *d*, y todavía más en *e*.

El papel de las masas distintas es evidente al disparar un cañón. Al hacerlo hay una interacción entre el cañón y la bala (figura 5.16). Un par de fuerzas actúa tanto en el cañón como en la bala. La fuerza que se ejerce sobre la bala es tan grande como la fuerza de reacción que se ejerce sobre el cañón; por eso éste da un culatazo (retrocede). Como las fuerzas son de igual magnitud, ¿por qué el cañón no retrocede con la misma rapidez con que la bala sale disparada? Al analizar los cambios de movimiento, recordamos que la segunda ley de Newton nos dice que también hay que tener en cuenta las masas que intervienen. Supongamos que *F* representa el valor de las fuerzas de acción y reacción, *m* la masa de la bala y *M* la masa del cañón, que es mayor. Las aceleraciones de la bala y del cañón se calculan con la relación de fuerza entre masa. Las aceleraciones son:

$$\text{Bala: } \frac{F}{m} = a$$

$$\text{Cañón: } \frac{F}{M} = a$$

Esto muestra por qué el cambio en la velocidad de la bala es tan grande en comparación con el cambio de velocidad del cañón. Una fuerza dada ejercida sobre una masa pequeña produce una aceleración grande; en tanto que la misma fuerza ejercida en una masa grande produce una aceleración pequeña.

Como en el ejemplo del objeto que cae, si usáramos símbolos igualmente exagerados para representar la aceleración de la Tierra como reacción a un objeto que cae, el símbolo *m* de la Tierra tendría un tamaño astronómico. La fuerza *F*, que es el peso del objeto que cae, dividida entre esta gran masa produciría una *a* microscópica que representaría la aceleración de la Tierra hacia el objeto que cae.

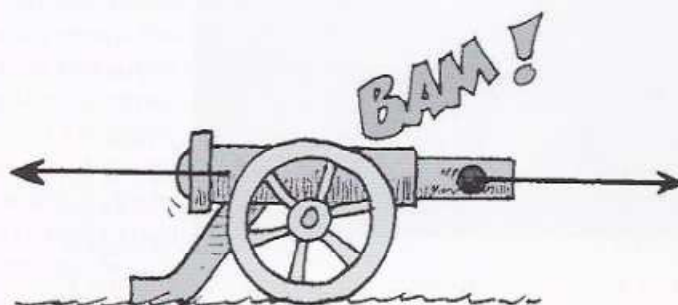


FIGURA 5.16

Figura interactiva

La fuerza que se ejerce contra el cañón que dispara y que lo hace retroceder es exactamente igual en magnitud que la fuerza que impulsa la bala. ¿Por qué, entonces, la bala acelera más que el cañón?

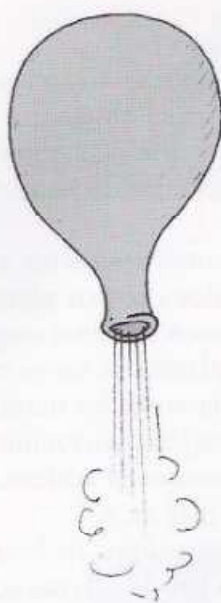


FIGURA 5.17

Cuando se le deja salir el aire el globo retrocede y se eleva.

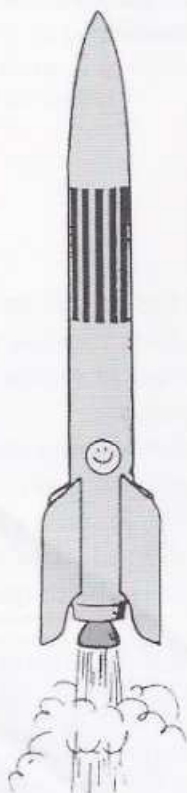


FIGURA 5.18

Debido a las "balas moleculares" que dispara, el cohete retrocede y sube.

Si ampliamos la idea del retroceso o culatazo del rifle por la bala que dispara, entenderemos la propulsión en los cohetes. Imagínate un globo inflado que retrocede cuando expulsa el aire (figura 5.17). Si el aire se expulsa hacia abajo, el globo acelera hacia arriba. El mismo principio se aplica a un cohete, el cual continuamente "recibe culatazos" a causa del gas que expulsa. Cada molécula del gas del escape es como una bala diminuta que dispara el cohete (figura 5.18).

Una idea errónea común es que el impulso del cohete se debe al impacto de los gases de escape contra la atmósfera. De hecho, antes de la aparición de los cohetes, mucha gente pensaba que era imposible mandar un cohete a la Luna. ¿Por qué? Por la ausencia de una atmósfera contra la que se impulsara el cohete. Pero es como decir que un cañón no puede tener retroceso porque las balas no tienen contra qué empujar. ¡No es verdad! Tanto el cohete como el cañón aceleran por las fuerzas de reacción debidas al material que disparan, no porque empujen sobre el aire. De hecho, un cohete funciona mejor arriba de la atmósfera, donde no hay resistencia de aire que se oponga a su movimiento.

Si aplicamos la tercera ley de Newton entenderemos cómo un helicóptero obtiene su fuerza de sustentación. Las aspas de la hélice tienen una forma tal que empujan las partículas de aire hacia abajo (acción), y el aire empuja a las aspas hacia arriba (reacción). Esta fuerza de reacción hacia arriba se llama *sustentación*. Cuando ésta es igual al peso del vehículo, el helicóptero se suspende en el aire. Cuando la sustentación es mayor, el helicóptero asciende por el aire.

Esto sucede con las aves y los aeroplanos. Las aves empujan el aire hacia abajo. A su vez, el aire las empuja hacia arriba. Cuando el ave asciende, las alas presentan una forma tal que el movimiento de las partículas de aire se desvía hacia abajo. Las alas de un aeroplano, con una inclinación ligera que desvía hacia bajo el aire que les llega, producen la sustentación del avión. El aire impulsado hacia abajo es el que mantiene la sustentación en forma constante. El abastecimiento de aire se obtiene con el movimiento del avión hacia adelante, debido a que las hélices o los cohetes empujan el aire hacia atrás. Cuando las hélices o los cohetes empujan el aire hacia atrás, el aire a su vez empuja a las hélices o a los cohetes hacia adelante. En el capítulo 14 veremos que la superficie curva de una ala es aerodinámica, lo cual aumenta la fuerza de sustentación.

EXAMÍNA TE

1. Un automóvil acelera por una carretera. Identifica la fuerza que lo mueve.
2. Un autobús muy veloz y un inocente insecto chocan de frente. La fuerza del impacto aplasta al pobre insecto contra el parabrisas. ¿La fuerza correspondiente que ejerce el insecto sobre el parabrisas es mayor, menor o igual al que ejerce el parabrisas sobre él? ¿La desaceleración del autobús es mayor, menor o igual que la del insecto?



FIGURA 5.19

Los gansos vuelan en formación "V", porque el aire que empujan hacia abajo con las puntas de sus alas se regresa, y al subir crea una corriente de aire hacia arriba que tiene más intensidad fuera del costado del ave. Una ave retrasada tiene mayor sustentación si se coloca en esta corriente ascendente, empuja el aire hacia abajo y crea otra corriente ascendente para el siguiente ganso, y así sucesivamente. El resultado es un vuelo en bandada con formación V.

PRÁCTICA DE FÍSICA

Juego de tirar la cuerda Figura interactiva

Jueguen a tirar de la cuerda entre chicos y chicas, sobre un piso pulido que esté algo resbaloso. Los chicos deberán usar sólo calcetines, y las chicas, zapatos con suela de goma. ¿Quiénes ganarán con seguridad y por qué? (Sugerencia: ¿quiénes ganan en el juego de tirar de la cuerda? ¿Los que tiran de ella más fuerte o quienes empujan con más fuerza contra el piso?)



FIGURA 5.20

No puedes tocar sin ser tocado: tercera ley de Newton.

Vemos que la tercera ley de Newton se aplica en cualquier parte. Un pez empuja el agua hacia atrás con las aletas, y el agua empuja al pez hacia adelante. El viento empuja contra las ramas de un árbol, y las ramas le regresan el empuje al viento, produciendo silbidos. Las fuerzas son interacciones entre cosas distintas. Todo contacto requiere cuando menos una paridad: No hay forma de que un objeto ejerza una fuerza sobre nada. Las fuerzas, sean grandes empujones o leves codazos, siempre se dan en pares, y cada una de ellas es opuesta a la otra. De manera que no podemos tocar sin ser tocados.

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. El asfalto (la carretera) es lo que impulsa al automóvil. ¡De veras! Aparte de la resistencia del aire, sólo el asfalto proporciona la fuerza horizontal al automóvil. ¿Cómo lo hace? Los neumáticos que giran impulsan la carretera hacia atrás (la acción). Al mismo tiempo, la carretera impulsa los neumáticos hacia adelante (reacción). ¿Qué te parece?
2. Las magnitudes de ambas fuerzas son iguales, porque forman un par de fuerzas de acción-reacción que constituye la interacción entre el autobús y el insecto. Sin embargo, las aceleraciones son muy distintas, porque las masas que intervienen son distintas. El insecto sufre una desaceleración enorme y letal; en tanto que el autobús sufre una desaceleración muy diminuta, tan diminuta que los pasajeros no la perciben. Pero si el insecto tuviera más masa, por ejemplo la masa de otro autobús, ¡esa desaceleración por desgracia sería muy evidente! (¿Puedes ver la maravilla de la física aquí? Aunque son muy diferentes el insecto y el autobús, la cantidad de fuerza que cada uno encuentra es la misma. ¡Sorprendente!)

Resumen de las tres leyes de Newton

La primera ley de Newton es la ley de la inercia: Un objeto en reposo tiende a permanecer en reposo; un objeto en movimiento tiende a permanecer en movimiento con rapidez constante y con trayectoria rectilínea. A esta propiedad de los objetos para resistir cambios de movimiento se le llama *inercia*. La masa es una medida de la inercia. Los objetos sufren cambios de movimiento sólo en presencia de una fuerza neta.

La segunda ley de Newton es la ley de la aceleración: Cuando una fuerza neta actúa sobre un objeto, el objeto acelera. La aceleración es directamente proporcional a la fuerza neta, e inversamente proporcional a la masa. En símbolos, $a = F/m$. La aceleración siempre tiene la dirección de la fuerza neta. Cuando los objetos caen en el vacío, la fuerza neta no es más que el peso, y la aceleración es g (el símbolo g representa que la aceleración sólo se debe a la gravedad). Cuando los objetos caen en el aire, la fuerza neta no es más que el peso menos la fuerza de resistencia del aire, y la aceleración es menor que g . Cuando la resistencia del aire es igual al peso de un objeto que cae, la aceleración termina y el objeto cae con rapidez constante (que se llama *rapidez terminal*).

La tercera ley de Newton es la ley de acción-reacción: Siempre que un objeto ejerce una fuerza sobre un segundo objeto, el segundo objeto ejerce una fuerza de igual magnitud y dirección opuesta sobre el primero. Las fuerzas se presentan en pares, una es la acción y la otra la reacción, y ambas forman la interacción entre un objeto y el otro. La acción y la reacción siempre ocurren simultáneamente y actúan sobre objetos distintos. Ninguna fuerza existe sin la otra.

Las tres leyes de Isaac Newton del movimiento son las reglas de la naturaleza que nos permiten maravillarnos por la manera en que muchas cosas se conectan entre sí. Vemos estas reglas en acción en nuestro ambiente cotidiano.

Vectores



Vectores

FIGURA 5.21

Este vector tiene una escala tal que 1 cm equivale a 20 N, y representa una fuerza de 60 N hacia la derecha.



El vector enamorado dice: "Yo sólo era un escalar hasta que llegaste y me diste dirección."

¡EUREKA!

Hemos aprendido que cualquier cantidad que requiera tanto magnitud como dirección para su descripción completa es una **cantidad vectorial**. Entre los ejemplos de cantidades vectoriales están la fuerza, la velocidad y la aceleración. En cambio, una cantidad que se describe sólo con su magnitud, y no implica dirección, se llama **cantidad escalar**. La masa, el volumen y la rapidez son cantidades escalares.

Una cantidad vectorial se representa con una flecha. Cuando la longitud (a escala) de la flecha representa la magnitud de la cantidad, y la dirección indica la dirección de la cantidad, se dice que la flecha es un **vector**.

La suma de vectores con direcciones paralelas es sencilla: Si tienen la misma dirección, se suman; si tienen direcciones opuestas, se restan. La suma de dos o más vectores se denomina la **resultante**. Para determinar la resultante de dos vectores que no tienen exactamente la misma dirección o la opuesta, se usa la **regla del paralelogramo**.² Se traza un paralelogramo donde los dos vectores sean lados

² Un paralelogramo es una figura con cuatro lados, donde los lados opuestos son paralelos entre sí. Por lo general, puedes obtener la longitud de la diagonal midiéndola; pero en el caso especial en el que dos vectores X y Y sean perpendiculares entre sí, puedes aplicar el teorema de Pitágoras $R^2 = X^2 + Y^2$, para obtener la resultante: $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$.



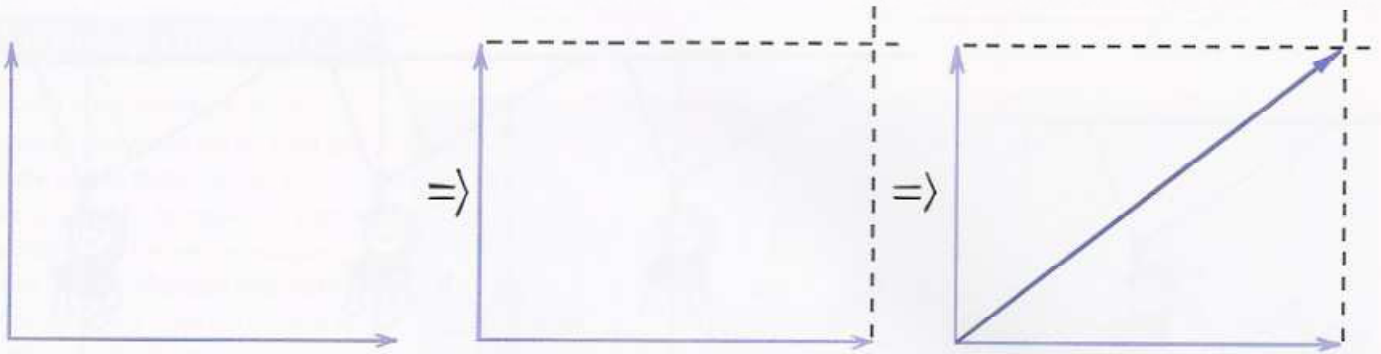


FIGURA 5.22 [Figura interactiva](#)

El par de vectores que forman un ángulo recto también forma dos lados de un rectángulo. La diagonal del rectángulo es su resultante.

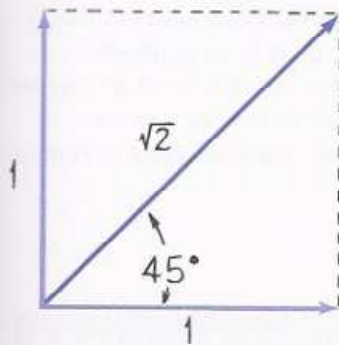


FIGURA 5.23

Cuando dos vectores de igual longitud y en ángulo recto se suman, forman un cuadrado. La diagonal del cuadrado es la resultante, y en este caso $\sqrt{2}$ veces es la longitud de cualquiera de los lados.

adyacentes, y la diagonal del paralelogramo representa la resultante. En la figura 5.22 los paralelogramos son rectángulos.

En el caso especial en que los dos vectores son de igual magnitud y perpendiculares entre sí, el paralelogramo es un cuadrado (figura 5.23). Ya que para todo cuadrado la longitud de una diagonal es igual a $\sqrt{2}$, o 1.41, por uno de los lados, la resultante es igual a $\sqrt{2}$ veces uno de los vectores. Por ejemplo, la resultante de dos vectores iguales con magnitud 100 que forman entre sí un ángulo recto es 141.

Vectores fuerza

En la figura 5.24 se muestra la vista superior de dos fuerzas horizontales que actúan sobre una caja. Una es de 30 newtons, y la otra es de 40 newtons. Sólo con medir se demuestra que la resultante de este par de fuerzas es 50 newtons.

La figura 5.25 presenta a Nellie Newton colgando en reposo de una cuerda. Observa que ésta actúa como un par de cuerdas que forman distintos ángulos con la vertical. ¿Cuál lado tiene la mayor tensión? Al examinar el sistema se ve que sobre Nellie actúan tres fuerzas: su peso, una tensión en el lado izquierdo de la cuerda y una tensión en el lado derecho de la cuerda. Como tienen distintos ángulos, las tensiones son distintas de cada lado de la cuerda. La figura 5.25 muestra una solución paso a paso. Como Nellie cuelga en equilibrio, su peso debe estar soportado por dos tensiones en la cuerda, que se deben sumar vectorialmente para igualar su peso. Al aplicar la regla del paralelogramo se demuestra que la tensión en el lado derecho de la cuerda es mayor que la del izquierdo. Si mides los vectores verás que la tensión en el lado derecho de la cuerda es más o menos el doble que la tensión en el izquierdo. Ambas tensiones se combinan para soportar su peso.

Más acerca de los vectores fuerza se puede encontrar en el apéndice D al final de este libro, así como en las páginas 23-30 del libro *Prácticas de física*.

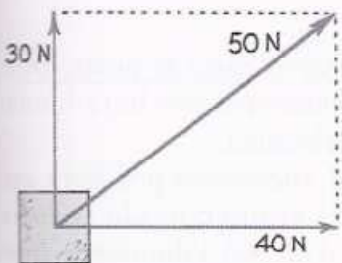


FIGURA 5.24

La resultante de estas fuerzas de 30 N y 40 N es 50 N.

Vectores velocidad

Recuerda que en el capítulo 3 se describió la diferencia entre rapidez y velocidad: la rapidez es una medida de “qué tan rápido”; la velocidad es una medida de qué tan rápido y también “en qué dirección”. Si el velocímetro del automóvil indica 100 kilómetros por hora, conoces tu rapidez. Si en el automóvil también hay una

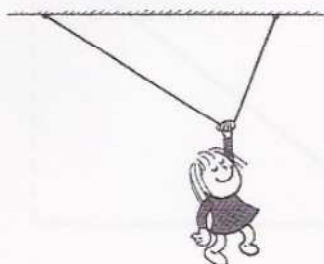
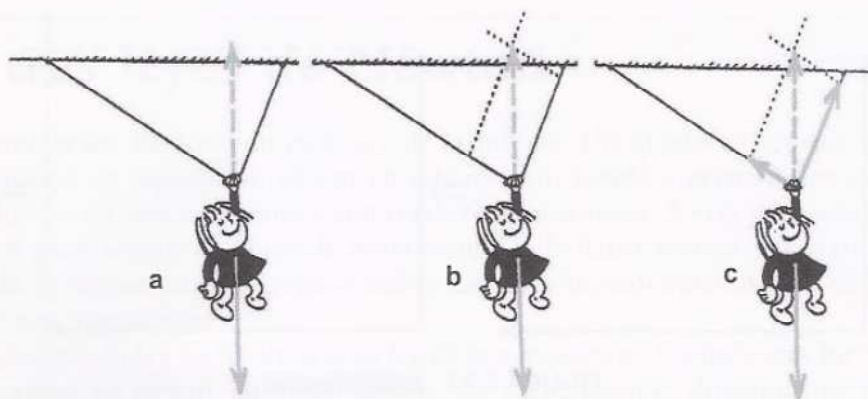


FIGURA 5.25

Nellie Newton cuelga inmóvil, con una mano en la cuerda del tendedero. Si la cuerda está a punto de romperse, ¿de qué lado es más probable que lo haga?

FIGURA 5.26 [Figura interactiva](#)

a) El peso de Nellie se representa con el vector vertical hacia abajo. Para que haya equilibrio se necesita un vector igual y opuesto, y se representa con el vector de la línea punteada. b) Este vector de línea punteada es la diagonal de un paralelogramo definido también por las líneas punteadas (más pequeñas). c) Las dos tensiones de la cuerda se indican con los vectores obtenidos. La tensión es mayor en la cuerda de la derecha, que será la que se rompa con más probabilidad.



Representación de vectores: Cómo sumar y restar vectores
Suma geométrica de vectores

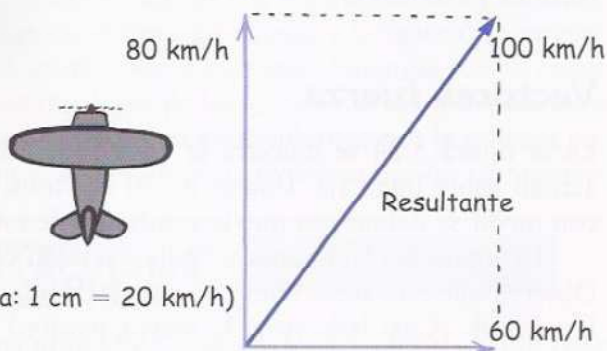


FIGURA 5.27

El viento transversal de 60 km/h impulsa a la avioneta que vuela a 80 km/h y la desvía de su curso a 100 km/h.



El par de vectores de 6 y de 8 unidades, en ángulo recto entre sí, afirman: "Somos un seis y un ocho, pero juntos hacemos un perfecto diez."

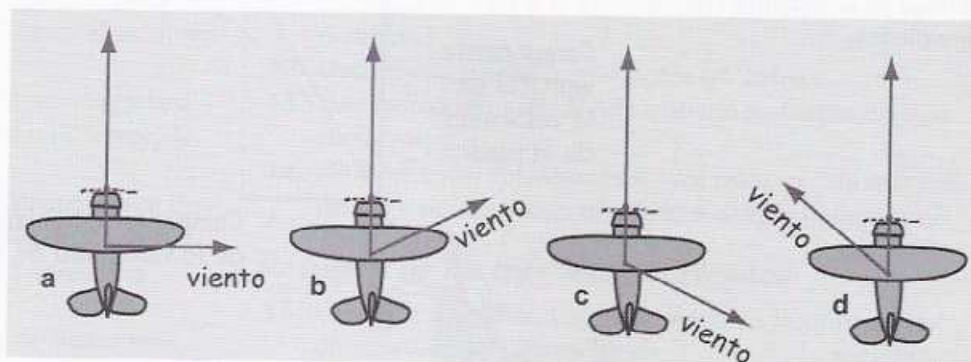
¡EUREKA!

brújula en el tablero, que indique que el vehículo se mueve hacia el norte, por ejemplo, entonces sabrías que tu velocidad es de 100 kilómetros por hora hacia el norte. Si sabes tu rapidez y tu dirección, conoces tu velocidad.

Imagina que una avioneta vuela hacia el norte a 80 kilómetros por hora en relación con el aire que la rodea. Supón que la atrapa un viento cruzado (viento que sopla perpendicular a la dirección de la avioneta) de 60 kilómetros por hora, que la empuja desviándola del curso trazado. Este ejemplo se representa con vectores en la figura 5.27, con los vectores velocidad a la escala de 1 centímetro a 20 kilómetros por hora. Entonces, la velocidad de la avioneta de 80 kilómetros por hora se representa con el vector de 4 centímetros; y la del viento cruzado de 60 kilómetros por hora, con el vector de 3 centímetros. La diagonal del paralelogramo que se traza (en este caso es un rectángulo) mide 5 cm, y representa 100 km/h. Entonces, en relación con el suelo, la avioneta se mueve a 100 km/h en una dirección intermedia entre el norte y el noreste.

PRÁCTICA DE FÍSICA

Ésta es una vista superior de un avión que es desviado de su ruta por vientos de varias direcciones. Con un lápiz, y usando la regla del paralelogramo, traza los vectores que muestren las velocidades resultantes en cada caso. ¿En cuál caso viaja el avión más rápido respecto al suelo? ¿En cuál viaja más lento?



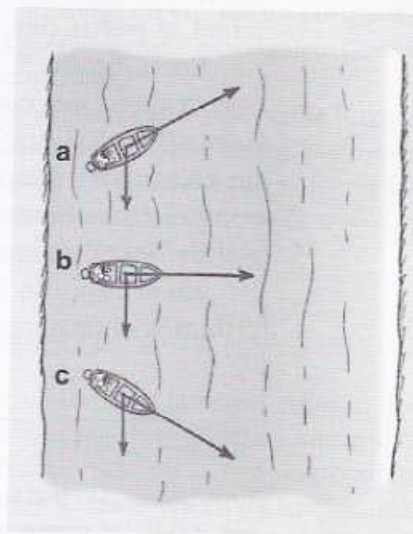
EXAMÍNAME

Una lancha de motor, que normalmente viaja a 10 km/h en aguas tranquilas, cruza un río y pone la proa perpendicular a la otra orilla. Si el río corre también a 10 km/h, ¿cuál será la velocidad de la lancha con respecto a la orilla?

PRÁCTICA DE FÍSICA

Éstas son vistas superiores de tres lanchas de motor que cruzan un río. Todas tienen la misma rapidez con respecto al agua, y todas están en la misma corriente de agua. Traza los vectores resultantes que indiquen la rapidez y la dirección de las lanchas. A continuación contesta lo siguiente:

- ¿Cuál lancha sigue la trayectoria más corta para llegar a la orilla opuesta?
- ¿Cuál lancha llega primero a la orilla opuesta?
- ¿Cuál lancha tiene la mayor rapidez?



Componentes de vectores

Así como se pueden combinar dos vectores perpendiculares en un vector resultante, también, a la inversa, cualquier vector se puede “descomponer” en dos vectores *componentes* perpendiculares entre sí. A estos dos vectores se les llama *componentes* del vector que reemplazan. El proceso de determinar los compo-

COMPRUEBA TU RESPUESTA

Cuando la lancha pone la proa directamente hacia la orilla (perpendicular, o en ángulo recto, a la corriente del río), su velocidad es 14.1 km/h, a 45 grados aguas abajo (de acuerdo con la figura 5.23).

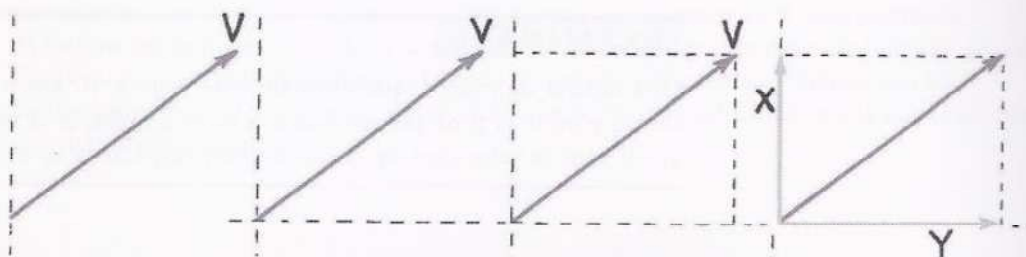
FIGURA 5.28

Componentes horizontal y vertical de la velocidad de una piedra.



FIGURA 5.29

Construcción de los componentes vertical y horizontal de un vector.



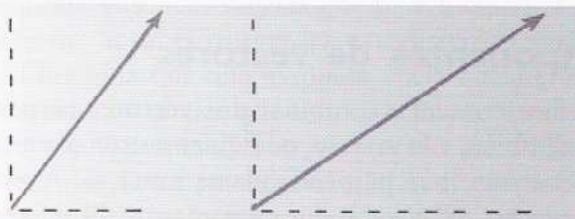
nentes de un vector se llama *descomposición*. Cualquier vector trazado en un papel se puede descomponer en un componente vertical y otro horizontal.

En la figura 5.29 se ilustra la descomposición de un vector V , que se traza con la dirección correcta para representar una cantidad vectorial. Entonces, las líneas (*los ejes*) vertical y horizontal se trazan en la cola del vector. Luego se traza un rectángulo que tenga V como diagonal. Los lados de este rectángulo son los componentes deseados, los vectores X y Y . Al revés, observa que la suma vectorial de X y Y es igual a V .

En el capítulo 10 regresaremos a los componentes de un vector, cuando describamos el movimiento de proyectiles.

EJERCICIO

Con una regla, traza los componentes vertical y horizontal de los dos vectores que observas. Mide los componentes y compara lo que determinaste con las respuestas de abajo.



RESPUESTA

Vector de la izquierda: El componente horizontal tiene 2 cm; el componente vertical tiene 2.6 cm. Vector de la derecha: El componente horizontal tiene 3.8 cm; el componente vertical tiene 2.6 cm.

Resumen de términos

Cantidad escalar Cantidad que tiene magnitud, pero no dirección. Como ejemplos están la masa, el volumen y la rapidez.

Cantidad vectorial Cantidad que tiene tanto magnitud como dirección. Como ejemplos están la fuerza, la velocidad y la aceleración.

Tercera ley de Newton Siempre que un objeto ejerce una fuerza sobre un segundo objeto, el segundo objeto ejerce una fuerza de igual magnitud y dirección opuesta sobre el primero.

Resultante Resultado neto de una suma de dos o más vectores.

Vector Flecha que se traza a escala para representar una cantidad vectorial.

Preguntas de repaso

Fuerzas e interacciones

1. Cuando empujas los dedos contra un muro se doblan porque están sometidos a una fuerza. Identifica esa fuerza.
2. Un boxeador puede golpear con gran fuerza un saco de arena. ¿Por qué no puede golpear un trozo de pañuelo desechable en el aire con la misma fuerza?
3. ¿Cuántas fuerzas se requieren en una interacción?

Tercera ley de Newton del movimiento

4. Enuncia la tercera ley de Newton del movimiento.
5. Un bate golpea a una pelota de béisbol. Si llamamos *fuerza de acción a la del bate contra la bola*, identifica la *fuerza de reacción*.
6. Acerca de la manzana y la naranja de la figura 5.9, si se considera que el sistema sólo es la naranja, ¿hay una fuerza neta sobre el sistema cuando la manzana jala?
7. Si se considera que el sistema abarca tanto a la manzana como a la naranja (figura 5.10), ¿hay una fuerza neta sobre el sistema cuando la manzana jala (ignora la fricción con el piso)?
8. Para producir una fuerza neta sobre un sistema, ¿debe haber una fuerza externa aplicada?
9. Considera el sistema de un balón de fútbol. Si lo pateas, ¿hay una fuerza neta que acelere el sistema? Si un amigo lo patea al mismo tiempo y con una fuerza igual y en dirección opuesta, ¿hay una fuerza neta que acelere el sistema?

Acción y reacción sobre masas distintas

10. La Tierra tira de ti hacia abajo, con una fuerza gravitacional que es tu peso. ¿Tiras de la Tierra con la misma fuerza?

11. Si las fuerzas que actúan sobre una bala y el cañón en retroceso que la dispara tienen igual magnitud, ¿por qué la bala y el arma tienen aceleraciones tan distintas?
12. Describe la fuerza que impulsa un cohete.
13. ¿Un helicóptero de dónde obtiene su fuerza de sustentación?
14. ¿Puedes tocar físicamente a otra persona, sin que esa persona te toque con una fuerza de igual magnitud?

Resumen de las tres leyes de Newton

15. Llena los espacios: Con frecuencia, a la primera ley de Newton se le llama ley de _____; la segunda ley de Newton es la ley de _____; y la tercera ley de Newton es la ley de _____; y de _____.
16. ¿En cuál de las tres leyes se define el concepto de interacción de fuerzas?

Vectores

17. Menciona tres ejemplos de cantidad vectorial y tres ejemplos de cantidad escalar.
18. ¿Por qué a la rapidez se le considera escalar y a la velocidad se le considera vector?
19. Según la regla del paralelogramo, ¿qué cantidad representa la diagonal de un paralelogramo?
20. Nellie cuelga en reposo en la figura 5.25. Si las cuerdas fueran verticales, paralelas, ¿cuál sería la tensión en cada una?
21. Cuando las cuerdas de Nellie forman un ángulo, ¿qué cantidad debe ser igual y opuesta a su peso?
22. Cuando un par de vectores forman ángulo recto, ¿la resultante es siempre mayor que cualquiera de los dos vectores por separado?

Proyecto

Con precaución saca la mano estando dentro de un automóvil en movimiento y colócala como si fuera un ala horizontal. A continuación inclina un poco hacia arriba el lado delantero, y siente el efecto de sustentación. ¿Sientes cómo se aplican las leyes de Newton en este caso?

Cálculos de un paso

1. Encuentra la resultante del siguiente par de velocidades: 100 km/h hacia el norte y 75 km/h hacia el sur. Calcula la resultante si ambas velocidades se dirigen hacia el norte.

Resultante de dos vectores en ángulo

recto entre sí; $R = \sqrt{X^2 + Y^2}$

2. Calcula la magnitud de la resultante de un par de vectores de velocidad de 100 km/h que están en ángulo recto uno entre sí.

3. Calcula la resultante de un vector horizontal con una magnitud de 4 unidades y un vector vertical con una magnitud de 3 unidades.
4. Calcula la velocidad resultante de un avión que normalmente vuela a 200 km/h, si enfrenta un viento de 50 km/h que le llega por un lado (formando un ángulo recto con el avión).

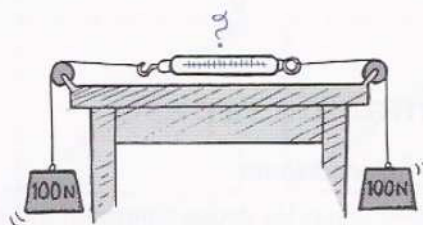
Ejercicios

1. Concilia el hecho de que la fricción actúa en una dirección opuesta al movimiento, aun cuando tu confías en que la fricción te impulsa hacia delante cuando caminas.
2. La fotografía de abajo muestra a Steve Hewitt y a su hija Gretchen. ¿Es Gretchen la que toca a su padre, o su padre la toca a ella? Explica por qué.



3. Cuando frota tus manos, ¿puedes empujar más fuerte sobre una de ellas?
4. En cada una de las siguientes interacciones, define cuáles son las fuerzas de acción y de reacción. a) Un martillo golpea un clavo. b) La gravedad de la Tierra tira hacia abajo un libro. c) Un aspa de helicóptero impulsa el aire hacia abajo.
5. Sujeta una manzana sobre tu cabeza. a) Identifica todas las fuerzas que actúan sobre la manzana, con sus fuerzas de reacción. b) Cuando la dejas caer, identifica todas las fuerzas que actúan sobre ella en su caída, y las fuerzas de reacción correspondientes. No tengas en cuenta la resistencia del aire.
6. Identifica los pares de acción-reacción de las fuerzas en los siguientes casos: a) Bajas de una acera. b) Das golpecitos en la espalda de un amigo. c) Una ola golpea una costa rocosa.
7. Un jugador de béisbol golpea una pelota. a) Describe los pares de acción-reacción al golpear la bola, y b) cuando la bola está en el aire.
8. ¿Qué física está implicada para un pasajero que se siente empujado hacia atrás, es decir, hacia el respaldo de su asiento en un avión, cuando éste acelera por la pista para despegar?
9. Cuando dejas caer al piso una pelota de goma, rebota casi hasta su altura original. ¿Qué fuerza hace que la bola rebote?
10. Cuando pateas un balón de fútbol, ¿qué fuerzas de acción y de reacción intervienen? ¿Qué fuerza, si hubiera alguna, sería mayor?

11. ¿Es verdad que cuando te caes al suelo de la rama de un árbol ejerces un jalón hacia arriba en la Tierra? Si es así, entonces ¿por qué la aceleración de la Tierra no se nota?
12. Cuando un libro descansa sobre una mesa, en su interior hay miles de millones de fuerzas que empujan y tiran de todas las moléculas. ¿Por qué esas fuerzas nunca, ni por casualidad, se suman y producen una fuerza neta en una dirección, haciendo que el libro se mueva "espontáneamente" por toda la mesa?
13. Dos pesas de 100 N se sujetan a una báscula de resorte, como se ve en la siguiente figura. ¿Qué indica la báscula, 0, 100 o 200 N o alguna otra cantidad? (Sugerencia: ¿indicaría distinto si una de las cuerdas se amarrara a la pared, en vez de tener colgada una pesa de 100 N?)



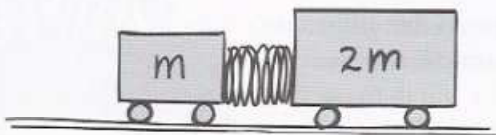
14. Cuando un atleta levanta pesas sobre su cabeza, la fuerza de reacción es el peso de la barra sobre la mano. ¿Cómo varía esta fuerza cuando las pesas se aceleran hacia arriba? ¿Y cuando se aceleran hacia abajo?
15. Sobre la persona parada e inmóvil de la figura actúan dos fuerzas que son el tirón hacia abajo de la gravedad, y la que hace el piso sobre él hacia arriba. ¿Son iguales y opuestas esas fuerzas? ¿Forman un par de acción-reacción? ¿Por qué?
16. ¿Por qué puedes ejercer mayor fuerza sobre los pedales de una bicicleta si te aferras al manubrio?
17. Cuando el bate golpea la pelota ¿aquél se desacelera? Sustenta tu respuesta.
18. ¿Por qué un escalador tira hacia abajo de la cuerda para subir?
19. Estás empujando un automóvil pesado. A su vez, éste te regresa el empuje con una fuerza igual y opuesta. ¿No significa esto que las fuerzas se anulan entre sí, haciendo imposible la aceleración? ¿Por qué o por qué no?
20. Un campesino arrea a su caballo para que tire de una carreta. El caballo se rehúsa, diciendo que sería inútil, porque violaría la tercera ley de Newton. Llegas a la conclusión de que no puede ejercer una fuerza mayor sobre la carreta, que la que la carreta ejerce sobre él, y en consecuencia no podrá acelerar la carreta. ¿Qué le explicarías para convencerlo de que comience a tirar?



21. El fortachón empuja dos furgones de igual masa que están sobre una vía, inicialmente inmóviles, antes de caer directo al suelo. ¿Es posible que haga que alguno de los dos furgones tenga una rapidez mayor que el otro? ¿Por qué?



22. Supón que hay dos carritos, uno con el doble de masa que el otro, salen despedidos cuando se suelta el resorte comprimido que hay entre ellos. ¿Con qué rapidez rueda el carrito más pesado, en comparación con el más ligero?



23. Si ejerces una fuerza horizontal de 200 N para hacer deslizar una caja por el piso de una fábrica, a velocidad constante, ¿cuánta fricción ejerce el piso sobre la caja? ¿Es la fuerza de fricción igual y con dirección opuesta a tu empuje de 200 N? Si la fuerza de fricción no es la fuerza de reacción a tu empuje, ¿cuál es?
24. Si un camión Mack y un automóvil Honda Civic chocaran de frente, ¿en cuál de los dos vehículos sería mayor la fuerza de impacto? ¿Cuál de los dos vehículos experimentaría mayor desaceleración? Explica tus respuestas.
25. Ken y Joanne son astronautas que flotan a cierta distancia en el espacio. Los une una cuerda de seguridad, cuyos extremos están atados sus cinturas. Si Ken comienza a jalar la cuerda, ¿Joanne será jalada hacia él, o él será jalado hacia Joanne, o se moverán los dos astronautas? Explica por qué.
26. ¿Cuál equipo gana un desafío de tirar de la cuerda: El que tira más fuerte de ella, o el que empuja con más fuerza sobre el suelo? Explica cómo.
27. En un juego de tirar de la cuerda entre Sam y Maddy, cada uno tira de ella con 250 N de fuerza. ¿Cuál es la tensión en la cuerda? Si los dos no se mueven, ¿qué fuerza horizontal se ejerce contra el suelo?
28. En un juego de tirar de la cuerda sobre un piso liso, entre hombres que usan calcetines y mujeres que usan zapatos con suela de goma (caucho), ¿por qué ganan las chicas?
29. Dos personas con igual masa juegan a tirar de una cuerda de 12 m, parados sobre un hielo sin fricción.

Cuando tiran de la cuerda cada uno se desliza hacia el otro. ¿Cómo se comparan sus aceleraciones y hasta dónde se desliza cada uno antes de detenerse?

30. ¿Qué aspecto de la física no conocía el que escribió este editorial, donde ridiculizaba los primeros experimentos de Robert H. Goddard con la propulsión de cohete sobre la atmósfera de la Tierra? "El profesor Goddard [...] no conoce la relación entre la acción y la reacción, ni la necesidad de tener algo mejor que un vacío contra el cual reaccionar [...] parece que le faltan los conocimientos que imparten diariamente nuestras escuelas de educación media."
31. ¿Cuáles de las siguientes cantidades son escalares, cuáles vectoriales y cuáles no son ni unas ni otras? a) velocidad; b) edad; c) rapidez; d) aceleración; e) temperatura.
32. ¿Qué puedes afirmar correctamente acerca de dos vectores que se suman para dar cero?
33. ¿Es posible que un par de vectores con diferentes magnitudes sumen cero? ¿Tres vectores diferentes pueden sumar cero? Sustenta tus respuestas.
34. ¿Cuándo un vector diferente de cero puede tener un componente horizontal de cero?
35. ¿Cuándo, si es el caso, una cantidad vectorial se puede sumar a una cantidad escalar?
36. ¿Qué se rompe con mayor probabilidad, una hama-ca tirante entre dos árboles, o una que cuelga entre ellos, cuando alguien la usa?
37. ¿Cuándo una ave pesada se posa sobre un tendadero, la tensión sobre éste será mayor si la cuerda se comba mucho o si se comba sólo un poco?
38. Una cuerda sostiene una linterna que pesa 50 N. ¿La tensión en la cuerda es menor, igual o mayor que 50 N? Utiliza la regla del paralelogramo para sustentar tu respuesta.

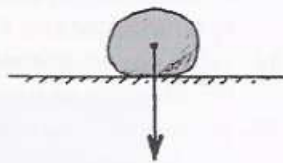


39. La cuerda se coloca en otra posición, como se ilustra, y aún sostiene la linterna de 50 N. ¿La tensión en la cuerda es menor, igual o mayor que 50 N? Utiliza la regla del paralelogramo para sustentar tu respuesta.



40. ¿Por qué la lluvia que cae verticalmente traza rayas inclinadas en la ventana de un automóvil en movimiento? Si las rayas forman un ángulo de 45° , ¿qué indican acerca de la rapidez relativa del automóvil y de la lluvia que cae?
41. Un globo flota inmóvil en el aire. Una persona comienza a trepar por el cable de soporte. ¿En qué dirección se mueve el globo conforme la persona trepa? Sustenta tu respuesta.
42. Una piedra está en reposo sobre el suelo. Hay dos interacciones donde interviene la piedra. Una es entre ella y la Tierra; la Tierra tira hacia abajo de la piedra (su peso) y la piedra tira de la Tierra hacia arriba. ¿Cuál es la otra interacción?

43. En la figura se observa una piedra en reposo sobre el suelo. a) El vector representa el peso de la piedra. Completa el diagrama vectorial, indicando otro vector que dé como resultado una fuerza neta de cero sobre la piedra. b) ¿Cuál es el nombre convencional del vector que trazaste?

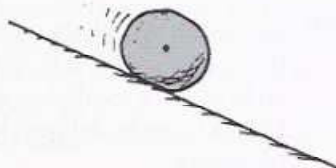


44. Aquí la piedra cuelga en reposo de un cordón. a) Trazas vectores de fuerza que representen todas las fuerzas que actúan sobre la piedra. b) ¿Tus vectores deberían tener una resultante de cero? c) ¿Por qué?

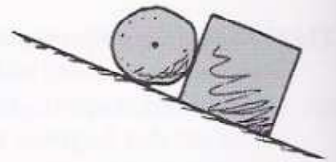


45. Aquí, la misma pieza es acelerada verticalmente hacia arriba. a) Trazas los vectores de fuerza, con una escala adecuada para mostrar las fuerzas relativas que actúan sobre la piedra. b) ¿Cuál es el vector más largo y por qué?
46. Supón que se rompe el cordón del ejercicio anterior y que la piedra desacelera su movimiento hacia arriba. Trazas un diagrama vectorial de fuerzas para la piedra, cuando llega hasta la cúspide de su trayectoria.
47. ¿Cuál es la aceleración de la piedra del ejercicio 46, cuando está en la cúspide de su trayectoria?

48. Aquí la piedra resbala por un plano inclinado sin fricción. a) Identifica las fuerzas que actúan sobre ella y traza los vectores de fuerza adecuados. b) Con la regla del paralelogramo traza la fuerza resultante sobre la piedra (con cuidado, para indicar que tiene una dirección paralela a la del plano inclinado, la misma dirección que la aceleración de la piedra).

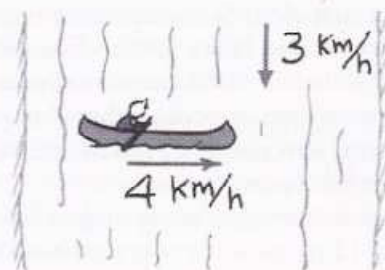


49. Aquí la piedra está en reposo, interactuando con la superficie del plano inclinado y también con un bloque. a) Identifica todas las fuerzas que actúan sobre la piedra y traza los vectores de fuerza adecuados. b) Demuestra que la fuerza neta sobre la piedra es cero. (Sugerencia 1: hay dos fuerzas normales sobre la piedra. Sugerencia 2: asegúrate de que los vectores que traces representen fuerzas que actúan sobre la piedra, y no que representen fuerza ejercida por la piedra sobre las superficies.)
50. Al dibujar un diagrama de fuerzas que actúan sobre un corredor, ¿cuáles de las siguientes *no* deberían dibujarse? El peso, mg ; la fuerza que ejerce el corredor sobre el suelo; la tensión en las pantorrillas del corredor.

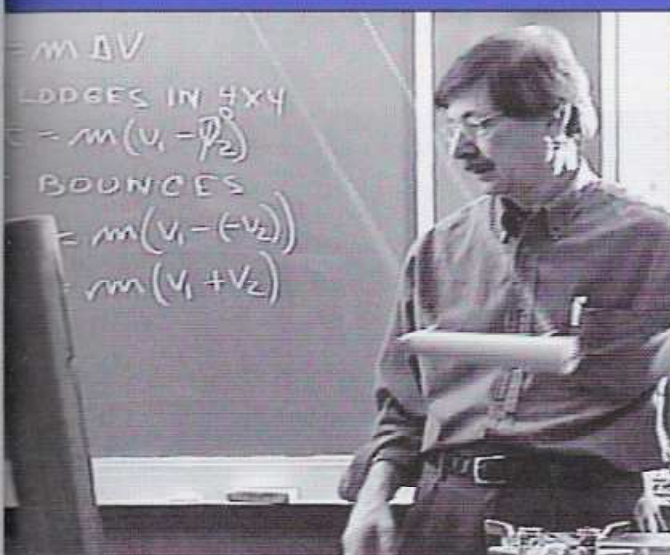


Problemas

- Un boxeador golpea una hoja de papel en el aire, y la pasa del reposo a una rapidez de 25 m/s en 0.05 s . ¿Si la masa del papel es 0.003 kg , qué fuerza ejerce el boxeador sobre ella?
- Si te paras junto a un muro, sobre una patineta sin fricción, y empujas al muro con 30 N de fuerza, ¿qué empuje tiene la pared sobre ti? Si tu masa es de 80 kg , ¿cuál será tu aceleración?
- Si las gotas de lluvia caen verticalmente con una rapidez de 3 m/s , y corres a 4 m/s , ¿con qué rapidez golpearán tu cara?
- Sobre un bloque con 2.0 kg de masa actúan fuerzas de 3.0 N y 4.0 N , las cuales forman ángulo recto. ¿Cuánta aceleración producen?
- Un avión cuya rapidez normal es 100 km/h , pasa por un viento cruzado del oeste hacia el este de 100 km/h . Calcula su velocidad con respecto al suelo, cuando su proa apunta al norte, dentro del viento cruzado.
- Vas remando en una canoa, a 4 km/h tratando de cruzar directamente un río que corre a 3 km/h , como se ve en la figura. a) ¿Cuál es la rapidez resultante de la canoa relativa a la orilla? b) ¿En aproximadamente qué dirección debería remarse la canoa para que llegue a la otra orilla y su trayectoria sea perpendicular al río?



Cantidad de movimiento



Howie Brand demuestra los distintos resultados que se obtienen cuando un dardo rebota en una tabla de madera en vez de pegarse en la tabla.



Cantidad de movimiento y choques

En el capítulo 2 presentamos el concepto de la inercia de Galileo y, en el capítulo 4, indicamos cómo se incorporó a la primera ley de Newton del movimiento. Describimos la inercia en términos de objetos en reposo y de objetos en movimiento. En este capítulo sólo nos ocuparemos de la inercia de los objetos en movimiento. Cuando se combinan las ideas de inercia y de movimiento se maneja la cantidad de movimiento. La *cantidad de movimiento* es una propiedad de las cosas que se mueven.

Cantidad de movimiento



Definición de cantidad de movimiento

Todos sabemos que es más difícil detener a un camión pesado que a un automóvil ligero que se mueven con la misma rapidez. Expresamos lo anterior diciendo que el camión tiene mayor cantidad de movimiento que el automóvil. Por **cantidad de movimiento** se indica la inercia en movimiento. En forma más específica, la cantidad de movimiento se define como el producto de la masa de un objeto por su velocidad, es decir

$$\text{Cantidad de movimiento} = \text{masa} \times \text{velocidad}$$

O bien, en notación compacta,

$$\text{Cantidad de movimiento} = mv$$

Cuando no importa la dirección, se puede decir que

$$\text{Cantidad de movimiento} = \text{masa} \times \text{rapidez},$$

que también se abrevia como mv .

De la definición se observa que un objeto en movimiento puede tener una gran cantidad de movimiento, si su masa o su velocidad son grandes, o si tanto su masa como su velocidad son grandes. El camión tiene más cantidad de movimiento que el automóvil que se mueve con la misma rapidez, porque la masa del primero es mayor. Se aprecia que un buque gigantesco que se mueva a una rapidez pequeña tiene una gran cantidad de movimiento, así como una bala pequeña que se mueva a gran rapidez. También, naturalmente, un objeto gigantesco que se mueva a gran rapidez, como sería un camión masivo que baja por una pendiente pronunciada, sin frenos, y tiene una cantidad de movimiento gigantesca; en tanto que el mismo camión en reposo no tiene ninguna cantidad de movimiento porque la parte v de mv es cero.

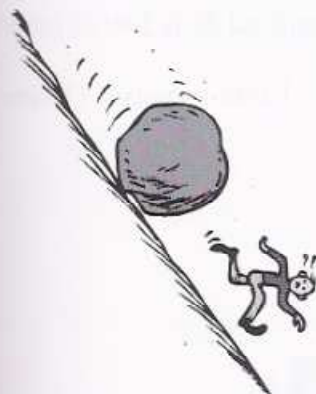


FIGURA 6.1

Por desgracia, la roca tiene mayor cantidad de movimiento que el corredor.



FIGURA 6.2

¿Por qué se suelen parar los motores de un supertanque petrolero unos 25 km antes de que llegue al puerto?

Impulso



El tiempo es especialmente importante al cambiar la cantidad de movimiento.

¡EUREKA!

Si la cantidad de movimiento de un objeto cambia, entonces pueden cambiar su masa, su velocidad, o ambas cuestiones. Si la masa permanece igual, como es el caso más frecuente, entonces la velocidad cambia y se presenta una aceleración. Y, ¿qué produce una aceleración? La respuesta es *una fuerza*. Cuanto mayor sea la fuerza que actúa sobre un objeto, mayor será el cambio de la velocidad y, en consecuencia, mayor será el cambio en la cantidad de movimiento.

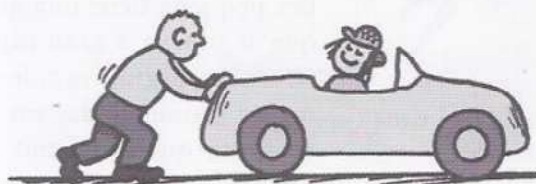
Pero hay algo más que importa cuando cambia la cantidad de movimiento: el tiempo, es decir, durante cuánto tiempo actúa la fuerza. Aplica una fuerza durante un corto tiempo a un automóvil parado y producirás un cambio pequeño de su cantidad de movimiento. Aplica la misma fuerza durante largo tiempo y resultará un mayor cambio de su cantidad de movimiento. Una fuerza sostenida durante largo tiempo produce más cambio de cantidad de movimiento, que la misma fuerza cuando se aplica durante un breve lapso. Así, para cambiar la cantidad de movimiento de un objeto importan tanto la magnitud de la fuerza como el tiempo durante el cual actúa la fuerza.

El producto de la *fuerza* $\times$ *el intervalo de tiempo* se llama *impulso*. O bien, en notación compacta,

$$\text{Impulso} = Ft$$

FIGURA 6.3

Cuando empujas con la misma fuerza durante el doble del tiempo, ejerces el doble del impulso y duplicas el cambio en la cantidad de movimiento que produces.



EXAMÍNATE

1. ¿Qué tiene más cantidad de movimiento, un automóvil de 1 tonelada que avance a 100 km/h o un camión de 2 toneladas que avance a 50 km/h?
2. ¿Tiene impulso un objeto en movimiento?
3. ¿Tiene cantidad de movimiento un objeto en movimiento?
4. Para la misma fuerza, qué cañón ejerce mayor impulso a la bala: uno largo o uno corto.

El impulso cambia la cantidad de movimiento

Cuanto mayor sea el impulso que se ejerce sobre algo, mayor será el cambio en la cantidad de movimiento. La relación exacta es

Impulso = cambio en la cantidad de movimiento

Podemos expresar todos los términos de esta relación en notación compacta, introduciendo el símbolo delta, Δ (una letra del alfabeto griego que se usa para indicar "cambio de" o "diferencia de"):¹

$$Ft = \Delta(mv)$$

La relación entre impulso y cantidad de movimiento ayuda a analizar muchos ejemplos en los que las fuerzas actúan y cambia el movimiento. A veces se puede considerar que el impulso es la causa de un cambio de movimiento. En algunas otras se puede considerar que un cambio de cantidad de movimiento es la causa de un impulso. No importa la forma en que uno se lo imagine. Lo importante es que el impulso y la cantidad de movimiento siempre vienen relacionados. Aquí describiremos algunos ejemplos ordinarios, en los cuales el impulso se relaciona con 1. un aumento de cantidad de movimiento; 2. una disminución de cantidad de movimiento durante largo tiempo, y 3. una disminución de la cantidad de movimiento durante un corto tiempo.

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Ambos tienen la misma cantidad de movimiento ($1 \text{ ton} \times 100 \text{ km/h} = 2 \text{ ton} \times 50 \text{ km/h}$).
2. No, el impulso no es algo que *tenga* un objeto. Es lo que puede *suministrar* o puede *sentir* un objeto cuando interactúa con otro objeto. Un objeto no puede tener impulso, al igual que no puede tener fuerza.
3. Sí, pero como velocidad en sentido relativo, esto es, con respecto a un marco de referencia que con frecuencia se toma como la superficie de la Tierra. La cantidad de movimiento que posee un objeto en movimiento, con respecto a un punto estacionario sobre la Tierra puede ser muy distinta de la que posee con respecto a otro objeto en movimiento.
4. El cañón largo ejercerá mayor impulso porque la fuerza actúa durante un periodo más largo. (Un impulso más grande producirá un cambio mayor en la cantidad de movimiento, de manera que un cañón grande ejercerá mayor rapidez a una bala que un cañón corto.)

¹ Esta relación se deriva al reordenar la segunda ley de Newton para hacer que el tiempo sea un factor más evidente. Si igualamos la fórmula para aceleración, $a = F/m$, con lo que esa aceleración es en realidad, $a = \Delta v/\Delta t$, tenemos $F/m = \Delta v/\Delta t$. A partir de esto, derivamos $F\Delta t = \Delta(mv)$. Simplificando Δt queda t , el intervalo de tiempo, y $Ft = \Delta(mv)$.



FIGURA 6.4

La fuerza del impacto contra una pelota de golf varía en todo el impacto.

Caso 1: aumento de la cantidad de movimiento

Si quieres aumentar la cantidad de movimiento de algo, deberás aplicar toda la fuerza que puedas durante el mayor tiempo posible. Un golfista que da el golpe inicial y un jugador de béisbol que intenta dar un *home run* hacen ambas cosas, cuando abanicen tan fuerte como sea posible, y acompañan el golpe en sus intentos. Así aumentan el tiempo de contacto.

La fuerza que interviene en los impulsos por lo general varía de un instante a otro. Por ejemplo, un palo de golf que golpea una pelota ejerce cero fuerza sobre ésta hasta que entran en contacto; entonces, la fuerza aumenta con rapidez conforme la pelota se deforma (figura 6.4). Cuando en este capítulo se habla de fuerzas de impacto, se indican las fuerzas *promedio*.

Caso 2: disminución de la cantidad de movimiento

Imagina que estás en un automóvil sin ningún control, y puedes optar por chocarlo contra un muro de concreto o contra un montón de paja. No necesitas saber mucha física para optar por lo mejor; pero ciertos conocimientos de esta ciencia te ayudarán a comprender por qué pegar contra algo suave es muy distinto a pegar contra algo duro. En el caso de chocar contra el muro o contra un pajar para detenerte requiere el *mismo* impulso, para disminuir tu cantidad de movimiento a cero. El mismo impulso significa igual *producto* de fuerza y tiempo, no la misma fuerza ni el mismo tiempo. Puedes elegir. Si chocas contra el montón de paja en vez de contra el muro, ampliarás el *tiempo durante el cual tu cantidad de movimiento baja a cero*. Un intervalo de tiempo mayor reduce la fuerza y disminuye la aceleración que resulta. Por ejemplo, si prolongas 100 veces el tiempo del impacto, reduces 100 veces la fuerza del impacto. Siempre que queramos que la fuerza sea pequeña, aumentaremos el tiempo de contacto. Es por esto que se utilizan tableros acojinados y bolsas de aire en los automóviles.

FIGURA 6.5

Un cambio de cantidad de movimiento durante un tiempo largo requiere una fuerza pequeña.

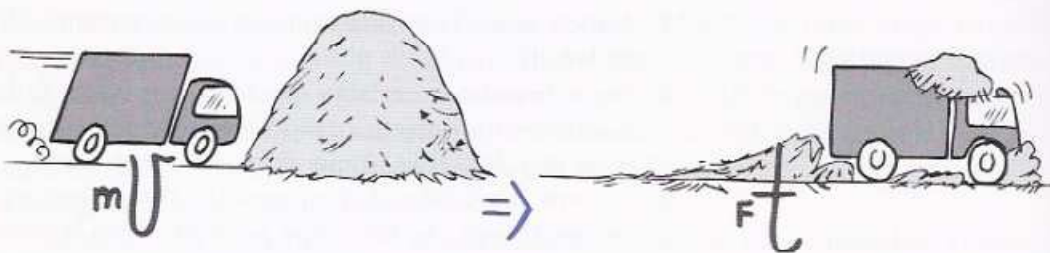


FIGURA 6.6

Un cambio de cantidad de movimiento durante un tiempo corto requiere una fuerza grande.

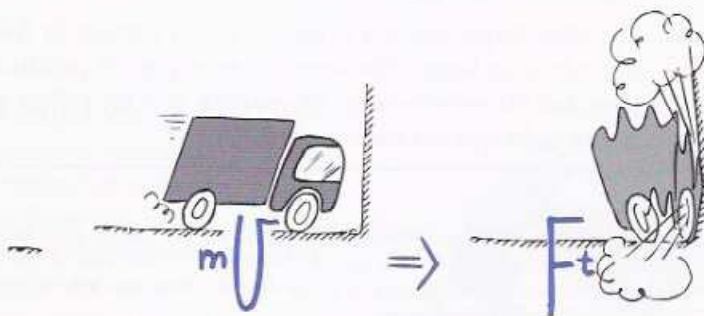




FIGURA 6.7

Un cambio grande de cantidad de movimiento durante un tiempo largo requiere una fuerza promedio pequeña.

Cuando alguien que salta desde una posición elevada hasta el suelo, ¿qué sucede si mantiene sus piernas estiradas y rígidas? ¡Ouch! En vez de ello, dobla las rodillas cuando sus pies hacen contacto con el suelo, aumentando así el tiempo durante el cual la cantidad de movimiento se reduce, 10 o 20 veces, en comparación con el tiempo de contacto con suelo con las piernas rígidas. La fuerza resultante sobre los huesos se reduce de 10 a 20 veces. Un luchador que se avienta al piso intenta ampliar su tiempo de impacto con la lona del cuadrilátero relajando sus músculos y ampliando el impacto a más partes de su cuerpo: pie, rodilla, cadera, costillas y hombros que sucesivamente golpean contra la lona. Desde luego, caer sobre la lona es preferible a estrellarse contra un piso sólido porque aquella también incrementa el tiempo durante el cual las fuerzas actúan.

La red de seguridad que utilizan los acróbatas del circo es un buen ejemplo de cómo alcanzar el impulso necesario para una caída segura. La red de seguridad reduce la fuerza que experimenta un acróbata que cae, aumentando sustancialmente el intervalo de tiempo durante el cual actúa la fuerza.

Si estás jugando béisbol y vas a atrapar una bola rápida a mano limpia, pones la mano hacia adelante para tener mucho espacio para que retroceda, después de hacer contacto con la bola. Así, prolongas el tiempo de impacto y en consecuencia reduces la fuerza del impacto. De igual modo, un boxeador se flexiona o cabecea el golpe, para reducir la fuerza del impacto (figura 6.8).



Cambio en la cantidad de movimiento. Seguido por: disminución de la cantidad de movimiento durante corto tiempo

Caso 3: disminución de la cantidad de movimiento durante corto tiempo

Si estás boxeando y avanzas al encuentro de un golpe en vez de alejarte de éste, te meterás en problemas. Lo mismo sucede, si atrapas una bola rápida moviendo la mano hacia ella, en vez de retrocederla, para tener el contacto. O cuando en un automóvil sin control lo chocas contra un muro de concreto, en vez de hacer-

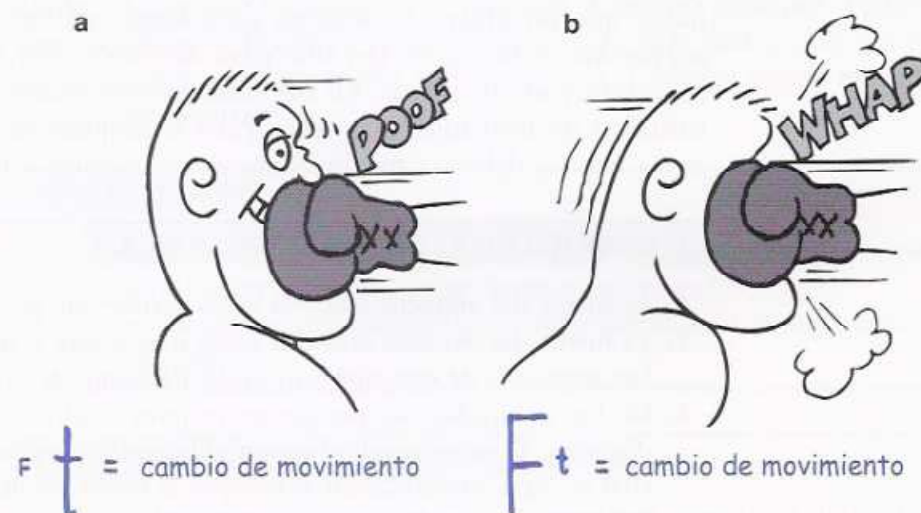


FIGURA 6.8

En ambos casos la quijada del boxeador proporciona un impulso que reduce la cantidad de movimiento del golpe. a) Cuando el boxeador se aleja (viaja con el golpe), extiende el tiempo y disminuye la fuerza. b) Si el boxeador sale al encuentro del guante, disminuye el tiempo de contacto y debe enfrentar una fuerza mayor.

**FIGURA 6.9**

Cassy imparte un gran impulso a los ladrillos, durante un tiempo corto, y produce una fuerza considerable.

lo contra un montón de paja. En esos casos de tiempos de impacto cortos, las fuerzas de impacto son grandes. Recuerda que para que un objeto se detenga hasta el reposo, el impulso es igual, sin importar cómo se detuvo. Pero si el tiempo es corto, la fuerza será grande.

La idea del tiempo corto de contacto explica cómo una experta en karate puede romper una pila de ladrillos con el golpe de su mano desnuda (figura 6.9). Lleva el brazo y la mano rápidamente contra los ladrillos, con una cantidad de movimiento apreciable. Esta cantidad de movimiento se reduce con rapidez al trasladar un impulso a los ladrillos. El impulso es la fuerza de la mano contra los ladrillos, multiplicada por el tiempo que hace contacto con ellos. Si la ejecución es rápida, hace que el tiempo de contacto sea muy breve y, en consecuencia, la fuerza de impacto es enorme. Si ella hace que la mano rebote en el impacto, la fuerza será todavía mayor.

EXAMÍNA TE

1. Si el boxeador de la figura 6.8 puede prolongar tres veces la duración del impacto cabeceando el golpe, ¿en cuánto se reducirá esa fuerza de impacto?
2. Si en vez de ello el boxeador busca *encontrarse* con el golpe para disminuir la duración del impacto a la mitad, ¿en cuánto aumentará la fuerza de impacto?
3. Un boxeador es alcanzado por un golpe, y lo cabecea para aumentar el tiempo y alcanzar los mejores resultados; en tanto que un experto en karate entrega su fuerza durante un intervalo corto, para obtener mejores resultados. ¿No hay una contradicción aquí?
4. ¿En qué caso el impulso es igual a la cantidad de movimiento?

Rebote

Sabes muy bien que si un florero cae de un armario hasta tu cabeza, tendrás problemas. Y si rebota en tu cabeza el problema será más grave. ¿Por qué? Por qué los impulsos son mayores cuando un objeto rebota. El impulso necesario para hacer que un objeto se detenga para luego, de hecho, “devolver el golpe”, es mayor que el necesario tan sólo para detenerlo. Por ejemplo, supón que atrapas el florero con las manos. En ese caso, proporcionas un impulso para reducir su cantidad de movimiento a cero. Pero si después tuvieras que lanzar el florero hacia arriba, deberías proporcionarle un impulso adicional. Este incremento en

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. La fuerza del impacto será tres veces menor que si no retrocediera.
2. La fuerza del impacto será dos veces mayor que si mantuviera su cabeza inmóvil. Los impactos de este tipo son causa frecuente de nocauts.
3. No hay contradicción, porque los mejores resultados de cada caso son muy distintos. El mejor resultado para el boxeador es que la fuerza se reduzca, lo cual se logra maximizando el tiempo. El mejor resultado para la karateca es que la fuerza sea grande, y se dé en el tiempo mínimo.
4. En general, el impulso es igual al *cambio* de cantidad de movimiento. Si la cantidad de movimiento inicial de un objeto es cero al aplicar el impulso, entonces el impulso = cantidad de movimiento final. Y si un objeto se lleva al reposo, entonces impulso = cantidad de movimiento inicial.

LEYES DE CONSERVACIÓN

Una ley de la conservación especifica que en un sistema ciertas cantidades permanecen exactamente constantes, a menos de que puedan ocurrir cambios dentro del sistema. Es una ley de conservación durante el cambio. En este capítulo vemos que la cantidad de movimiento permanece sin cambio durante los choques. Decimos que se conserva la cantidad de movimiento. En el siguiente capítulo aprenderemos que la energía se conserva cuando se transforma: la cantidad de energía de la luz, por ejemplo, se transforma por completo en energía térmica cuando se absorbe la luz. En el capítulo 8 veremos que la cantidad de movimiento angular se conserva; cualquiera que sea el movimiento rotacional del sistema planetario, su canti-

dad de movimiento angular permanecerá sin cambio siempre que esté libre de influencias externas. En el capítulo 22 veremos que la carga eléctrica se conserva, lo cual significa que puede no puede crearse ni destruirse. Cuando estudiamos la física nuclear, veremos que esta y otras leyes de la conservación rigen el mundo submicroscópico. Las leyes de la conservación son la fuente de profundas reflexiones a cerca de la regularidad de la naturaleza y a menudo se consideran las leyes más fundamentales de la física. ¿Puedes pensar en cosas que permanezcan constantes en tu vida mientras que otras experimentan cambios?



FIGURA 6.10

La rueda de Pelton. Las aspas curvadas hacen que el agua rebote y haga una vuelta en U, lo cual produce mayor impulso para hacer girar la rueda.

la cantidad de impulso es la misma que tu cabeza suministra cuando el florero rebota en ella.

La fotografía de inicio de este capítulo muestra al profesor de física Howie Brand lanzando un dardo contra un bloque de madera. Cuando el dardo tiene la punta afilada como un clavo, se inserta en el bloque de madera al detenerse, y el bloque permanece vertical. Cuando al dardo se le retira la punta afilada y se le coloca una de goma achatada, el bloque se viene abajo. La fuerza contra el bloque es mayor cuando ocurre un rebote.

El hecho de que los impulsos sean mayores cuando hay rebotes se usó con mucho éxito en California en los días de la fiebre del oro. Las ruedas hidráulicas que se usaban en minería para la extracción del oro no eran eficaces. Un hombre llamado Lester A. Pelton observó que el problema eran las aspas planas de las ruedas. Entonces diseñó unas aspas curvas que hacían que el agua que llegaba hiciera una vuelta en U al impacto con ellas, es decir, que “rebotara”. De este modo, el impulso ejercido sobre la rueda aumentó bastante. Pelton patentó su idea, la rueda de Pelton, y probablemente hizo más dinero con ella que la mayoría de los mineros con el oro que extrajeron. La física puede enriquecer tu vida en muchas formas.

EXAMÍNA TE

1. Acerca de la figura 6.9, ¿cómo se compara la fuerza que ejerce la persona sobre los ladrillos con la fuerza que se ejerce en su mano?
2. ¿Cómo variará el impulso resultante del impacto, si la mano rebotara al golpear los tabiques?

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Según la tercera ley de Newton, las fuerzas serán iguales. Sólo la elasticidad de la mano y el adiestramiento que ha adquirido para fortalecer su mano le permiten realizar esta hazaña sin que se le fracturen los huesos.
2. El impulso será mayor si la mano rebotara en los ladrillos al golpearlos. Si no aumenta en forma proporcional el tiempo del impacto, se ejerce entonces una fuerza mayor sobre los ladrillos (¡y sobre la mano!).

Conservación de la cantidad de movimiento

De la segunda ley de Newton sabemos que si deseamos acelerar un objeto, debemos aplicarle una fuerza neta. En este capítulo hemos dicho casi lo mismo, aunque con otras palabras. Para cambiar la cantidad de movimiento de un objeto debemos aplicarle un impulso.

Únicamente un impulso externo a un sistema puede cambiar la cantidad de movimiento del sistema. Las fuerzas y los impulsos internos no lo harán. Por ejemplo, las fuerzas moleculares en el interior de una pelota de béisbol no tienen efecto alguno sobre la cantidad de movimiento de ella, así como una persona que está sentada dentro de un automóvil, y que empuja el tablero de instrumentos, no afecta la cantidad de movimiento del vehículo. Las fuerzas moleculares dentro de la pelota de béisbol y un impulso al tablero son fuerzas internas. Ocurren en pares en equilibrio que se anulan. Se requiere una fuerza externa que actúe sobre la pelota o el automóvil. Si no hay fuerza externa alguna, no hay impulso externo y no es posible cambiar la cantidad de movimiento.

Como ejemplo piensa en un cañón que dispara (figura 6.11). La fuerza sobre la bala dentro del cañón es igual y opuesta a la fuerza que causa que el cañón dé un culatazo. Puesto que estas fuerzas actúan al mismo tiempo, los impulsos también son iguales y opuestos. Recuerda la tercera ley de Newton sobre las fuerzas de acción y de reacción. También se aplica al impulso. Los impulsos son internos al sistema que abarca la bala y el cañón, de manera que no cambian la cantidad de movimiento del sistema bala-cañón. Antes del disparo la cantidad de movimiento neta o total era cero. Después del disparo, la cantidad de movimiento neta sigue siendo cero. No se ganó ni se perdió cantidad de movimiento.

La cantidad de movimiento, al igual que las cantidades de velocidad y de fuerza, tiene tanto dirección como magnitud. Es una *cantidad vectorial*. Al igual que la velocidad y la fuerza, la cantidad de movimiento puede anularse. Así, aunque la bala del cañón en el ejemplo anterior gana cantidad de movimiento cuando sale disparada, y el cañón que retrocede gana cantidad de movimiento en la dirección opuesta, no hay ganancia en el *sistema* cañón-bala. Las cantidades de movimiento de la bala y del cañón son iguales en magnitud y opuestas en dirección.² Por lo tanto, estas cantidades de movimiento se anulan para dar cero en el siste-

La cantidad de movimiento se conserva en todas las colisiones, ya sean elásticas o inelásticas (siempre que no interfieran fuerzas externas).

¡EUREKA!

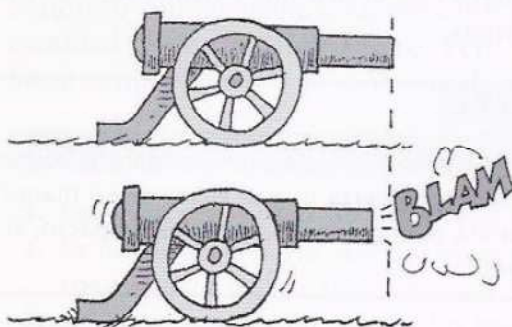


FIGURA 6.11

Figura interactiva

La cantidad de movimiento antes del disparo es cero. Después del disparo, la cantidad de movimiento neta sigue siendo cero porque la cantidad de movimiento del cañón es igual y opuesta a la de la bala.

² Aquí ignoramos la cantidad de movimiento de los gases expulsados de la pólvora que explota y que, en ocasiones, son considerables. Disparar un arma con balas de salva a corta distancia es algo que jamás debe hacerse a causa de la considerable cantidad de movimiento de los gases expulsados. Más de una persona ha muerto a causa de balas de salva que se disparan a corta distancia. En 1998, un ministro en Jacksonville, Florida, pretendía hacer una dramatización durante su sermón ante varios cientos de fieles, incluida su familia, y se disparó en la cabeza con una Magnum calibre .357 cargada con balas de salva. Aunque no salió ninguna bala de la pistola, sí escaparon gases en cantidad suficiente para resultar mortales. Así que, estrictamente hablando, la cantidad de movimiento de una bala (si acaso hay alguna) + la cantidad de movimiento de los gases de escape es igual a la cantidad de movimiento opuesta del arma que retrocede.



FIGURA 6.12

Una bola blanca de billar golpea de frente la bola 8. Considera este evento como tres sistemas: a) Una fuerza externa actúa en el sistema de la bola 8 y su cantidad de movimiento se incrementa. b) Una fuerza externa actúa sobre el sistema de la bola blanca y su cantidad de movimiento disminuye. c) Ninguna fuerza externa actúa sobre el sistema bola blanca + bola 8 y la cantidad de movimiento se conserva (simplemente se transfiere de una parte del sistema a la otra).

ma como un todo. Puesto que ninguna fuerza externa neta actúa sobre el sistema, no hay impulso neta sobre éste y no hay cambio neta en la cantidad de movimiento. Como podrás ver, *si ninguna fuerza neta o ningún impulso neta actúa sobre un sistema, no cambia la cantidad de movimiento de ese sistema.*

Cuando no cambia la cantidad de movimiento (o cualquier cantidad en física), entonces decimos que *se conserva*. La idea de que la cantidad de movimiento se conserva cuando no actúan fuerzas externas constituye una ley fundamental de la mecánica, llamada la **ley de la conservación de la cantidad de movimiento**, que establece que

En ausencia de una fuerza externa, la cantidad de movimiento de un sistema permanece sin cambio.

Si en un sistema donde todas las fuerzas son internas —como por ejemplo, vehículos que chocan, núcleos atómicos que experimentan decaimiento radiactivo o estrellas que estallan—, la cantidad de movimiento neta del sistema es la misma antes y después del evento.

EXAMÍNA TE

1. La segunda ley de Newton establece que, si no se ejerce ninguna fuerza neta sobre un sistema, no ocurre aceleración. ¿De esto se desprende que tampoco ocurre cambio en la cantidad de movimiento?
2. La tercera ley de Newton establece que la fuerza que ejerce un cañón sobre la bala es igual y opuesta a la fuerza que la bala ejerce sobre el cañón. ¿De esto se desprende que el *impulso* que ejerce el cañón sobre la bala es igual y opuesto al *impulso* que la bala ejerce sobre el cañón?

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Sí, porque el hecho de que no haya aceleración significa que no ocurre ningún cambio en la velocidad o en la cantidad de movimiento (masa $\times$ velocidad). Otra vertiente de razonamiento concluye simplemente que el hecho de que no haya fuerza neta significa que no hay impulso neta ni, por lo tanto, cambio en la cantidad de movimiento.
2. Sí, porque la interacción entre ambos ocurre durante el mismo intervalo de *tiempo*. Puesto que el tiempo es el mismo y las fuerzas son iguales y opuestas, los impulsos (Ft) también son iguales y opuestos. El impulso es una cantidad vectorial y puede anularse.

Choques

La cantidad de movimiento se conserva en los choques, es decir, la cantidad de movimiento neta de un sistema de objetos que chocan no cambia antes, durante ni después de la colisión. Esto se debe a que las fuerzas que actúan durante el choque son fuerzas internas, que actúan y reaccionan dentro del sistema mismo. Sólo hay una redistribución o partición de la cantidad de movimiento que haya antes de la colisión.

En cualquier choque se puede decir que

Cantidad de movimiento

neta antes del choque = cantidad de movimiento neta después del choque

Esto es cierto, independientemente de la forma en que se muevan los objetos antes de chocar.

Cuando una bola de billar rueda y choca de frente contra otra que está en reposo, la que rodaba se detiene y la otra bola avanza con la rapidez que tenía la bola que la chocó. A esto se le llama **choque elástico**; en el caso ideal, los objetos que chocan rebotan sin tener deformación permanente, y sin generar calor (figura 6.13). Pero la cantidad de movimiento se conserva hasta cuando los objetos que chocan se enredan entre sí durante el choque. A esto se le llama **choque ine-**

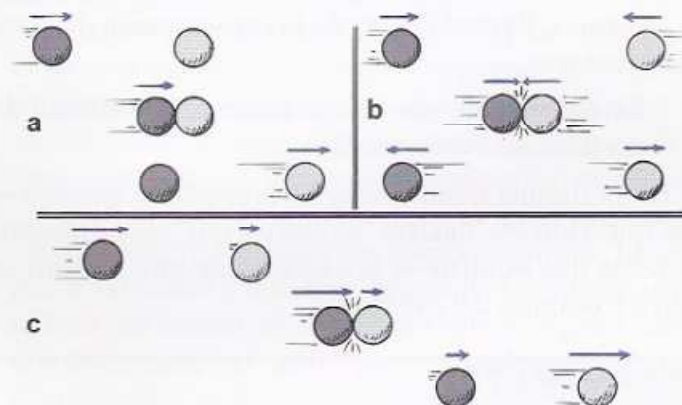


FIGURA 6.13

Figura interactiva

Choques elásticos entre bolas de igual masa. a) Una bola oscura choca contra una bola clara que está en reposo. b) Un choque de frente. c) Un choque entre bolas que tienen la misma dirección. En todos los casos se transfiere cantidad de movimiento de una bola a otra.

lástico, y se caracteriza por la deformación permanente o la generación de calor, o por ambas cuestiones. En un choque perfectamente inelástico, ambos objetos se adhieren. Por ejemplo, imagina el caso de un furgón que se mueve por una vía y choca contra otro furgón que está en reposo (figura 6.14). Si los dos furgones tienen igual masa y se acoplan en el choque, ¿se puede calcular la velocidad de los carros enganchados después del impacto?

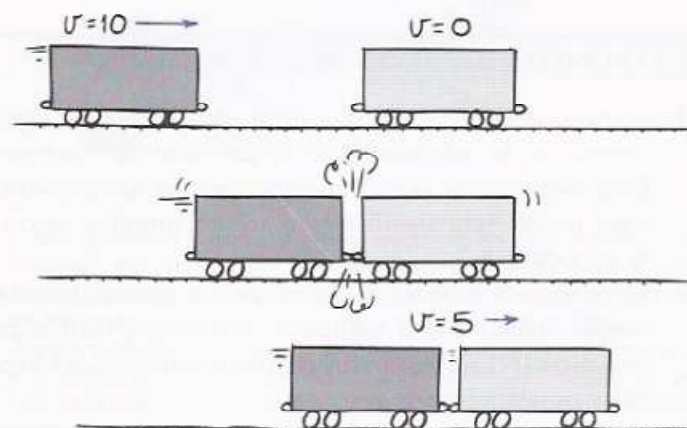


FIGURA 6.14

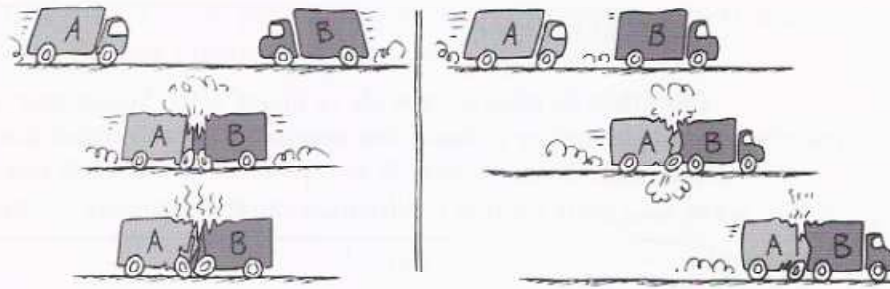
Figura interactiva

Choque inelástico. La cantidad de movimiento del furgón de la izquierda se combina con la del furgón de la derecha, después del choque.

FIGURA 6.15

Figura interactiva

Choques inelásticos. La cantidad de movimiento neta de los camiones antes y después del choque es la misma.



Supongamos que el primer furgón se mueve a 10 metros por segundo, y que la masa de cada furgón es m . Entonces, de acuerdo con la conservación de la cantidad de movimiento,

$$(mv_{\text{neto}})_{\text{antes}} = (mv_{\text{neto}})_{\text{después}}$$

$$(m \times 10)_{\text{antes}} = (2m \times V)_{\text{después}}$$

Con operaciones algebraicas sencillas, $V = 5$ m/s. Esto tiene sentido, porque después del choque se mueve el doble de masa, y la velocidad debe ser la mitad de la que había antes de la colisión. En consecuencia, ambos lados de la ecuación son iguales.

Observa la importancia de la dirección en estos casos. Como en el caso de cualquier par de vectores, las cantidades de movimiento en la misma dirección tan sólo se suman. Si dos objetos se están acercando, se considera que una de las cantidades de movimiento es negativa y las dos se combinan por sustracción o resta.

Observa las colisiones inelásticas de la figura 6.15. Si A y B se mueven con cantidades de movimiento iguales, pero en direcciones opuestas (A y B chocan de frente), entonces se considera que una de ellas es negativa, y las dos se suman algebraicamente y su resultado es cero. Después del choque, la chatarra unida queda en el punto del impacto y su cantidad de movimiento es cero.

Si, por otro lado, A y B se mueven en la misma dirección (A alcanza a B), la cantidad de movimiento neta no es más que la suma de las cantidades de movimiento individuales.

Sin embargo, si A se mueve hacia el este con, digamos, 10 unidades más de cantidad de movimiento que B, que se mueve hacia el oeste (no aparece en la figura), después del choque la chatarra enredada se mueve hacia el este con 10 unidades de cantidad de movimiento. El montón llega finalmente al reposo, en forma natural, por la fuerza externa de fricción sobre el piso. No obstante, el tiempo del impacto es corto, y la fuerza del impacto del choque es mucho mayor que la fuerza externa de fricción, por lo que la cantidad de movimiento inmediatamente antes y después del choque, para fines prácticos, se conserva. La cantidad de movimiento neta justo antes de que choquen los camiones (10 unidades) es igual a la cantidad de movimiento combinada de la chatarra de camiones inmediatamente después del impacto (10 unidades). Se aplica el mismo principio a las naves espaciales que se acoplan suavemente, donde la fricción está ausente por completo. Su cantidad de movimiento justo antes del acoplamiento se conserva como cantidad de movimiento justo después del acoplamiento.



FIGURA 6.16

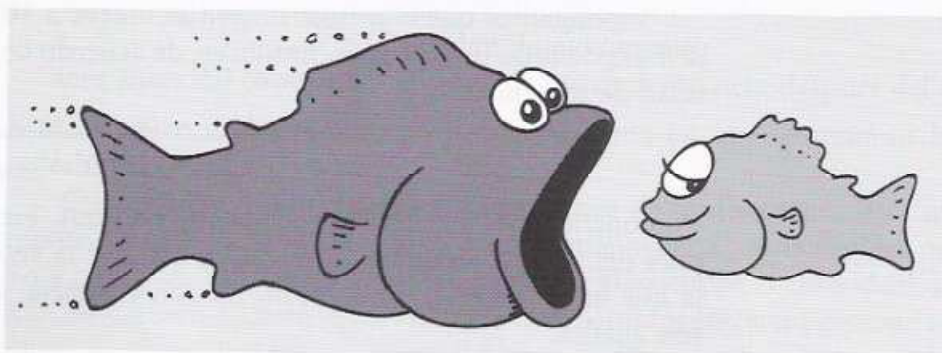
Will Maynes demostró su pista de aire. Las ráfagas de aire que salen de los diminutos agujeros brindan una superficie sin fricción para las carretillas que se deslizan sobre ella.

EXAMÍNATE

Considera la pista de aire de la figura 6.16. Supón que una carretilla de 0.5 kg de masa se desliza y choca con una carretilla en reposo que tiene una masa de 1.5 kg., quedando sujeta a ésta. Si la rapidez de la carretilla que se desliza antes del impacto es v_{antes} , ¿qué rapidez tendrán las carretillas unidas al deslizarse después del choque?

FIGURA 6.17

Dos peces forman un sistema que tiene la misma cantidad de movimiento justo antes del bocado y justo después del bocado.



Como un ejemplo numérico de la conservación de la cantidad de movimiento, imagínate un pez que nada hacia otro más pequeño, que está en reposo, y se lo almuerza (figura 6.17). Si el pez mayor tiene 5 kg de masa y nada a 1 m/s hacia el otro, cuya masa es de 1 kg, ¿cuál será la velocidad del pez mayor inmediatamente después de su bocado? No tendremos en cuenta los efectos de la resistencia del agua.

$$\begin{aligned} \text{Cantidad de movimiento neta antes del bocado} &= \\ \text{cantidad de movimiento neta después del bocado} &= \\ (5 \text{ kg}) (1 \text{ m/s}) + (1 \text{ kg}) (0 \text{ m/s}) &= (5 \text{ kg} + 1 \text{ kg}) v \\ 5 \text{ kg} \cdot \text{m/s} &= (6 \text{ kg}) v \\ v &= 5/6 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Se ve aquí que el pez pequeño no tiene cantidad de movimiento antes de que se lo coman, porque su velocidad es cero. Después del bocado, la masa combinada de los dos peces se mueve a una velocidad v que, de acuerdo con operaciones algebraicas sencillas, resulta 5/6 m/s. Esta velocidad tiene la misma dirección que la que tenía el pez más grande.

Ahora supón que el pez pequeño en el ejemplo anterior no está en reposo, sino que nada hacia la izquierda con una velocidad de 4 m/s. Nada en dirección

COMPRUEBA TU RESPUESTA

Según la conservación de la cantidad de movimiento, la cantidad de movimiento de la carretilla de 0.5 kg antes del choque = cantidad de movimiento de ambas carretillas unidas, después del choque.

$$\begin{aligned} 0.5v_{\text{antes}} &= (0.5 + 1.5)v_{\text{después}} \\ v_{\text{después}} &= \left(\frac{0.5}{2.0}\right)v_{\text{antes}} = \frac{v_{\text{antes}}}{4} \end{aligned}$$

Esto tiene sentido porque después del choque se moverá cuatro veces más masa, y así las carretillas unidas se deslizarán más lentamente. La misma cantidad de movimiento representa con cuatro veces la masa que se desliza a 1/4 de la rapidez.

contraria a la del pez mayor; su dirección es negativa, si se considera que la dirección del pez mayor es positiva. En este caso,

$$\begin{aligned} &\text{Cantidad de movimiento} \\ &\text{neta antes del bocado} = \text{cantidad de movimiento} \\ &\text{neta después del bocado} \\ &(5 \text{ kg}) (1 \text{ m/s}) + (1 \text{ kg}) (-4 \text{ m/s}) = (5 \text{ kg} + 1 \text{ kg}) v \\ &(5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}) - (4 \text{ kg} \cdot \text{m/s}) = (6 \text{ kg}) v \\ &1 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 6 \text{ kg } v \\ &v = 1/6 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Observa que la cantidad de movimiento negativa del pez más pequeño, antes del bocado, tiene más eficacia para frenar al pez mayor, después del bocado. Si el pez menor se moviera con el doble de velocidad, entonces

$$\begin{aligned} &\text{Cantidad de movimiento} \\ &\text{neta antes del bocado} = \text{cantidad de movimiento} \\ &\text{neta después del bocado} \\ &(5 \text{ kg}) (1 \text{ m/s}) + (1 \text{ kg}) (-8 \text{ m/s}) = (5 \text{ kg} + 1 \text{ kg}) v \\ &(5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}) - (8 \text{ kg} \cdot \text{m/s}) = (6 \text{ kg}) v \\ &-3 \text{ kg} \cdot \text{m/s} = 6 \text{ kg } v \\ &v = -1/2 \text{ m/s} \end{aligned}$$

En este caso vemos que la velocidad final es $-1/2 \text{ m/s}$. ¿Qué significa el signo menos? Quiere decir que la velocidad final es *contraria* a la velocidad inicial del pez más grande. Después del bocado, el sistema de los dos peces se mueve hacia la izquierda. Dejaremos como problema de final de capítulo calcular la velocidad inicial que debe tener el pez menor para detener al mayor.

Choques más complicados

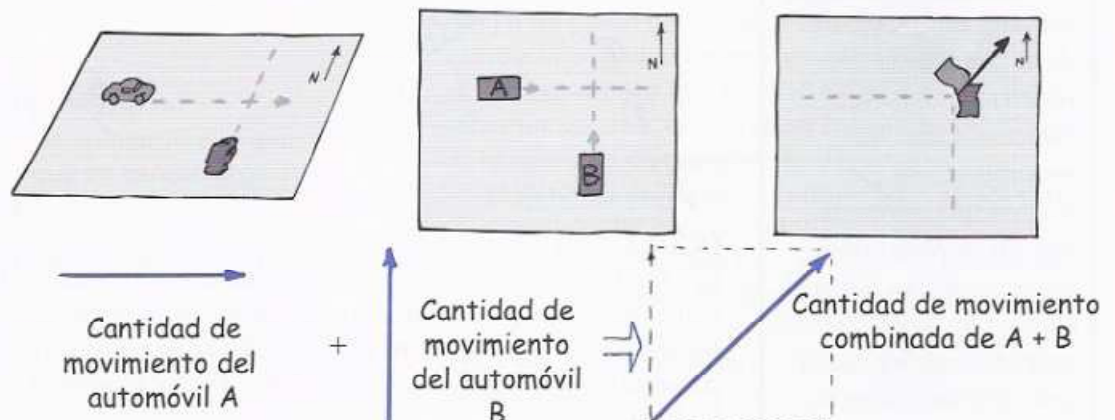
La cantidad de movimiento neta permanece sin cambio en cualquier choque, independientemente del ángulo que forman las trayectorias de los objetos que chocan. Para determinar la cantidad de movimiento neta cuando intervienen distintas direcciones se puede usar la regla del paralelogramo, para sumar vectores. No describiremos aquí esos casos complicados con mucho detalle, sino que trabajaremos algunos ejemplos sencillos para ilustrar el concepto.

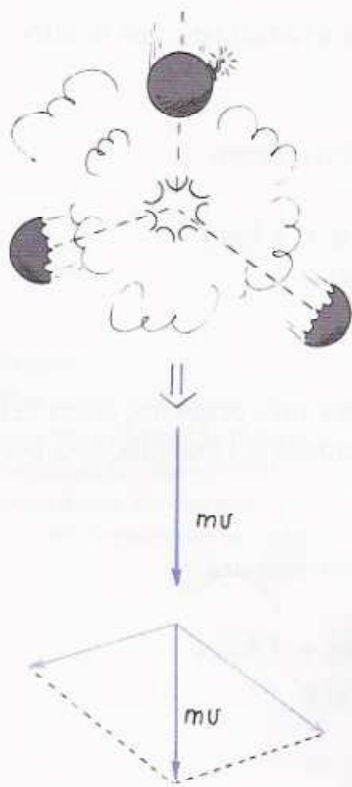
En la figura 6.18 se observa un choque entre dos automóviles que se mueven en ángulo recto entre sí. El automóvil A tiene su cantidad de movimiento hacia el este; en tanto que la del automóvil B se dirige hacia el norte. Si cada cantidad de

FIGURA 6.18

Figura interactiva

La cantidad de movimiento es una cantidad vectorial.



**FIGURA 6.19**

Después de que explota la bomba, las cantidades de movimiento de sus fragmentos se suman (vectorialmente) e igualan a la cantidad de movimiento original.



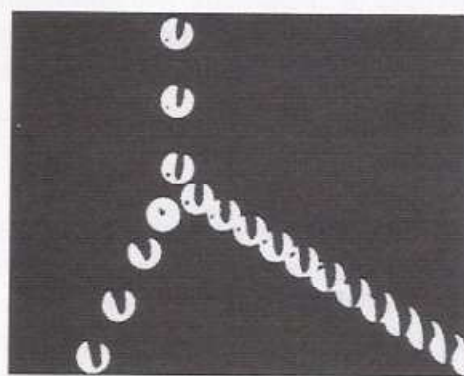
A diferencia de las explosiones en la Tierra, aquellas que ocurren en el espacio exterior alcanzan elevadas velocidades iniciales que no se reducen por la acción de la gravedad ni por la resistencia del aire. Las cantidades de movimiento de los fragmentos permanecen sin cambio conforme éstos viajan hacia el exterior en líneas rectas indefinidamente hasta que chocan contra algo.

¡EUREKA!

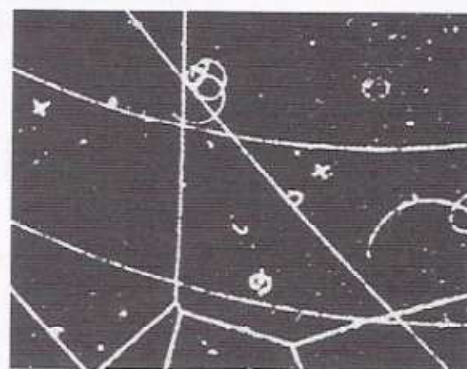
movimiento tiene igual magnitud, su cantidad de movimiento combinada tiene dirección noreste. Ésta es la dirección de los automóviles unidos después del choque. Vemos que así como la diagonal de un cuadrado no es igual a la suma de los dos lados, la magnitud de la cantidad de movimiento resultante tampoco será igual a la suma aritmética de las dos cantidades de movimiento antes de la colisión. Recuerda la relación entre la diagonal de un cuadrado y la longitud de uno de sus lados (figura 5.23, capítulo 5): la diagonal es $\sqrt{2}$ por la longitud de uno de los lados del cuadrado. Entonces, en este ejemplo, la magnitud de la cantidad de movimiento resultante será igual a $\sqrt{2}$ por la cantidad de movimiento de uno de los vehículos.

La figura 6.19 representa un juego pirotécnico que explota y se parte en dos. Las cantidades de movimiento de los fragmentos se combinan mediante suma vectorial, para igualar la cantidad de movimiento original de la bomba que caía. La figura 6.20b amplía este concepto al mundo microscópico, donde se visualizan las trayectorias de partículas subatómicas en una cámara de burbujas con hidrógeno líquido.

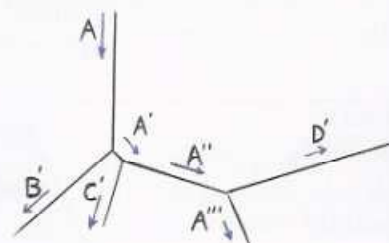
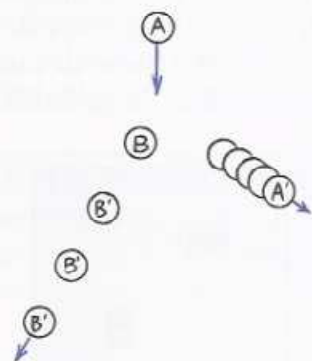
Sea cual fuere la naturaleza de un choque, o por complicado que éste sea, la cantidad total de movimiento antes, durante y después de él permanece invariable. Esta ley tiene extrema utilidad y permite aprender mucho a cerca de los choques, sin conocer detalle alguno de las fuerzas que actúan durante el choque. En el siguiente capítulo veremos que se conserva tanto la energía como la cantidad de movimiento. Si se aplica la conservación de la energía y de la cantidad de movimiento a las partículas subatómicas que se observan en diversas cámaras de detección, se pueden calcular las masas de esas partículas diminutas. Esa



a



b

**FIGURA 6.20**

La cantidad de movimiento se conserva tanto en las bolas de billar que chocan como en partículas nucleares que chocan en una cámara de burbujas de hidrógeno líquido. a) La bola de billar A golpea a la B, que inicialmente estaba en reposo. En la parte b), el protón A choca consecutivamente con los protones B, C y D. Los protones en movimiento dejan trazas de burbujas diminutas.

observación se obtiene midiendo las cantidades de movimiento y energías, antes y después de los choques. Es notable que se alcanzó este logro sin conocer exactamente las fuerzas que actúan.

La conservación de la cantidad de movimiento y de la energía (que estudiaremos en el siguiente capítulo) son dos herramientas poderosas de la mecánica. Su aplicación brinda información detallada que va de los hechos acerca de las interacciones de las partículas subatómicas, hasta la estructura y movimiento de galaxias completas.

Resumen de términos

Cantidad de movimiento Producto de la masa de un objeto por su velocidad.

Choque elástico Colisión o impacto donde los objetos que chocan rebotan sin tener deformación permanente ni generar calor.

Choque inelástico Colisión o impacto donde los objetos que chocan se deforman, generan calor y posiblemente quedan pegados.

Ley de la conservación de la cantidad de movimiento Cuando no actúa fuerza externa alguna sobre un objeto o sistema de objetos, no hay cambio de cantidad de movimiento. Por consiguiente, la cantidad de movimiento antes de un evento donde sólo intervengan fuerzas internas, es igual a la cantidad de movimiento después del evento:

$$mv_{(\text{antes del evento})} = mv_{(\text{después del evento})}$$

Impulso Producto de la fuerza que actúa sobre un objeto por el tiempo durante el cual actúa.

Relación entre el impulso y la cantidad de movimiento El impulso es igual al cambio en la cantidad de movimiento del objeto sobre el cual actúa. En notación simbólica

$$Ft = \Delta mv$$

ble, prolongar esa fuerza hasta donde puedas, o ambas cuestiones? Explica por qué.

7. Cuando estás en el camino de un objeto en movimiento y tu destino es sufrir una fuerza de impacto, ¿es mejor que disminuyas la cantidad de movimiento de esa cosa, durante corto tiempo o durante largo tiempo? Explica por qué.
8. ¿Por qué se aconseja extender tu mano hacia adelante cuando te preparas a cachar una bola rápida de béisbol a mano limpia?
9. ¿Por qué no sería buena idea recargar el dorso de tu mano en la barda del jardín del parque de béisbol para atrapar un batazo muy largo?
10. En el karate, ¿por qué es mejor que la fuerza se aplique durante un tiempo corto?
11. En el boxeo, ¿por qué es mejor girar con el golpe?

Rebote

12. ¿Qué sufre el cambio mayor en cantidad de movimiento: 1. una bola de béisbol al ser atrapada, 2. una bola de béisbol que es lanzada o 3. una bola de béisbol que es atrapada y a continuación lanzada de regreso, si en todos los casos las bolas tienen la misma rapidez justo antes de ser atrapadas e inmediatamente después de ser lanzadas?
13. En la pregunta anterior, ¿en qué caso se requiere el mayor impulso?

Conservación de la cantidad de movimiento

14. ¿Puedes producir un impulso neto en un automóvil si te sientas dentro de él y empujas hacia adelante el tablero de instrumentos? ¿Pueden las fuerzas internas en un balón de fútbol producir un impulso que cambie la cantidad de movimiento del balón?
15. ¿Es correcto decir que si no se ejerce impulso neto sobre un sistema, entonces no habrá cambio alguno de la cantidad de movimiento del sistema?
16. ¿Qué significa decir que la cantidad de movimiento (o que cualquier otra cantidad) se *conserva*?
17. Cuando se dispara una bala se conserva la cantidad de movimiento para el *sistema* bala-cañón. ¿Se conservaría la cantidad de movimiento del sistema, si la cantidad de movimiento no fuera una cantidad vectorial? Explica.

Preguntas de repaso

Cantidad de movimiento

1. ¿Qué tiene mayor cantidad de movimiento, un pesado camión parado o una patineta en movimiento?

Impulso

2. ¿En qué se diferencian impulso y fuerza?
3. ¿Cuáles son las dos formas de aumentar el impulso?
4. Para la misma fuerza, ¿por qué un cañón largo imprime mayor rapidez a una bala que un cañón corto?

El impulso cambia la cantidad de movimiento

5. ¿Tiene algo que ver la relación entre impulso y cantidad de movimiento con la segunda ley de Newton?
6. Para impartir la máxima cantidad de movimiento a un objeto, ¿deberías ejercer la máxima fuerza posi-

Choques

- Describe la diferencia entre *choque elástico* y *choque inelástico*. ¿En cuál clase de choque se conserva la cantidad de movimiento?
- El carro de ferrocarril A rueda con determinada rapidez, y tiene un choque perfectamente elástico con el carro B, de la misma masa. Después del choque se observa que el carro A queda en reposo. ¿Cómo se compara la rapidez del carro B con la rapidez inicial del carro A?
- Si los carros de igual masa de la pregunta anterior quedan pegados después de chocar inelásticamente, ¿cómo se compara su rapidez después del choque con la rapidez inicial del carro A?

Choques más complicados

- Supón que una bola de mastiche (masilla) rueda horizontalmente, que su cantidad de movimiento es $1 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$ y choca y que se pega a otra bola idéntica que se mueve verticalmente con una cantidad de movimiento de $1 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$. ¿Por qué su cantidad de movimiento combinada no es tan sólo la suma aritmética, es decir, $2 \text{ kg}\cdot\text{m/s}$?
- En la pregunta anterior, ¿cuál es la cantidad total de movimiento de las bolas de mastiche antes y después del choque?

Cálculos de un paso

$$\text{Cantidad de movimiento} = mv$$

- ¿Cuál es la cantidad de movimiento de una bola de bolos de 8 kg que rueda a 2 m/s?
- ¿Cuál es la cantidad de movimiento de una caja de cartón de 50 kg que se desliza a 4 m/s por una superficie cubierta de hielo?

$$\text{Impulso} = Ft$$

- ¿Qué impulso ocurre cuando una fuerza promedio de 10 N se ejerce sobre una carreta durante 2.5 s?
- ¿Qué impulso ocurre cuando la misma fuerza de 10 N actúa sobre la carretilla durante el doble de tiempo?

$$\text{Impulso} = \text{cambio en la cantidad de movimiento}; Ft = \Delta mv$$

- ¿Cuál es el impulso sobre una bola de 8 kg que rueda a 2 m/s cuando choca contra una almohada y se detiene?
- ¿Cuánto impulso detiene una caja de cartón de 50 kg que se desliza a 4 m/s cuando encuentra una superficie rugosa?

$$\text{Conservación de la cantidad de movimiento:}$$

$$mv_{\text{antes}} = mv_{\text{después}}$$

- Una bola de mastiche de 2 kg que se mueve 3 m/s choca contra otra bola de mastiche de 2 kg en reposo. Calcula la rapidez de las dos bolas unidas inmediatamente después del choque.
- Calcula la rapidez de las dos bolas de mastiche si la que está en reposo es de 4 kg.

Proyecto

Cuando estés muy adelantado en tus estudios, en una tarde libre, entra a un billar cercano y nota la conservación de la cantidad de movimiento. Observa que sin importar lo complicado de los choques entre las bolas, la cantidad de movimiento a lo largo de la línea de acción de la bola blanca es igual a la cantidad de movimiento combinada de todas las demás bolas, en la misma dirección anterior, después del impacto; y que los componentes de las cantidades de movimiento perpendiculares a esta línea de acción se anulan a cero después del impacto, es decir, tiene el mismo valor que antes del impacto en esta dirección. Aprenderás con más claridad tanto la naturaleza vectorial de la cantidad de movimiento como su conservación, cuando no se imparten efectos de giro a la bola blanca. Cuando se imparten tales efectos golpeando la bola fuera de su centro, también se conserva la cantidad de movimiento de rotación, lo cual complica algo el análisis. Pero independientemente de cómo se golpee la bola blanca, en ausencia de fuerzas externas, siempre se conservan tanto la cantidad de movimiento lineal como la de rotación. El pool o la carambola son una demostración de primera línea de la conservación de la cantidad de movimiento en acción.



Ejercicios

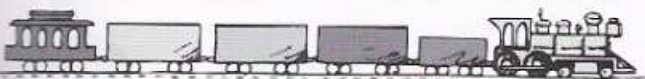
- Para detener un supertanque petrolero, se suelen parar sus motores más o menos a 25 km del puerto. ¿Por qué es tan difícil detener o virar un supertanque?
- En términos de impulso y cantidad de movimiento, ¿por qué los tableros de instrumentos acojinados hacen que los automóviles sean más seguros?
- En términos de impulso y de cantidad de movimiento, ¿por qué las bolsas de aire de los automóviles reducen las probabilidades de lesiones en los accidentes?
- ¿Por qué los gimnastas colocan cojines muy gruesos en el piso?
- En términos de impulso y cantidad de movimiento, ¿por qué los escaladores prefieren las cuerdas de *nailon*, que se estiran bastante bajo tensión?
- ¿Por qué es una locura para un practicante del salto en bungee utilizar un cable de acero en lugar de una cuerda elástica.
- Cuando se salta desde una altura considerable, ¿por qué es conveniente caer con las rodillas algo flexionadas?
- Una persona puede sobrevivir a un impacto de pie, con una rapidez aproximada de 12 m/s (27 mi/h) sobre concreto; a 15 m/s (34 mi/h) sobre tierra y a 34 m/s (76 mi/h) sobre agua. ¿Por qué los valores son diferentes en las superficies diferentes?
- Cuando en el béisbol se atrapa un *foul*, ¿por qué es importante extender los brazos a mano limpia hacia

arriba de manera que las manos se puedan mover hacia abajo al atrapar la pelota?

10. Anteriormente, los automóviles se fabricaban para hacerlos tan rígidos como fuera posible; mientras que en la actualidad los automóviles se diseñan para abollarse con los golpes. ¿Por qué?
11. En términos de impulso y cantidad de movimiento, ¿por qué es importante que las aspas de un helicóptero desvíen al aire hacia abajo?
12. Un vehículo lunar se prueba en la Tierra, con una rapidez de 10 km/h. Cuando viaje a esa velocidad sobre la Luna, su cantidad de movimiento será ¿mayor, menor o igual?
13. En general es mucho más difícil detener un camión pesado que una patineta, cuando se mueven con la misma rapidez. Describe un caso en el que la patineta pueda necesitar más fuerza de frenado (considera tiempos relativos).
14. Si lanzas un huevo crudo contra una pared lo romperás; pero si lo lanzas con la misma rapidez contra una sábana colgante no se romperá. Explica esto usando los conceptos estudiados en este capítulo.
15. ¿Por qué es difícil para un bombero sujetar una manguera que lanza grandes chorros de agua con alta rapidez?
16. ¿Tendrías inconveniente en disparar un arma de fuego cuyas balas fueran 10 veces más masivas que el arma? Explica por qué.
17. ¿Por qué los impulsos que ejercen los objetos que chocan entre sí son iguales y opuestos?
18. Si se lanza una pelota hacia arriba, desde el piso, con una cantidad de movimiento de 10 kg m/s, ¿cuál es la cantidad de movimiento del retroceso del mundo? ¿Por qué no la sentimos?
19. Cuando una manzana cae de un árbol y golpea el piso sin rebotar, ¿qué destino tuvo su cantidad de movimiento?
20. ¿Por qué un golpe es más intenso cuando se da con el puño limpio que con un guante de boxeo?
21. ¿Por qué se golpea más fuerte con guantes de boxeo de 6 onzas que con guantes de 16 onzas?
22. Un boxeador puede golpear un costal pesado durante más de una hora sin cansarse, pero se cansa con rapidez, en unos minutos, al boxear contra un oponente. ¿Por qué? (*Sugerencia:* cuando el puño del boxeador se apunta al costal, ¿qué suministra el impulso para detener los golpes? Cuando su puño se dirige al oponente, ¿qué o quién suministra el impulso para detener los golpes antes de que conecten?)
23. Los carros del ferrocarril se enganchan con holgura, para que haya una demora apreciable desde que la locomotora mueve al primero hasta que mueve al último. Describe la ventaja de este enganche holga-

do y la flojedad entre los carros, desde el punto de vista del impulso y de la cantidad de movimiento.

24. Si sólo una fuerza externa puede cambiar la velocidad de un cuerpo, ¿por qué la fuerza interna de los frenos pueden detener un automóvil?
25. Estás en la proa de una canoa que flota cerca de un muelle. Saltas, esperando que caerás fácilmente en el puente, pero en lugar de ello caes al agua. Explica por qué.
26. Explica cómo un enjambre de insectos voladores puede tener una cantidad de movimiento neta igual a cero.
27. Un persona totalmente vestida está en reposo en la mitad de un estanque, sobre hielo perfectamente sin fricción, y debe llegar a la orilla. ¿Cómo lo podría hacer?
28. Si lanzas una pelota horizontalmente estando parado sobre patines, rodará hacia atrás con una cantidad de movimiento que coincide con la de la pelota. ¿Rodará hacia atrás si haces los movimientos de lanzamiento, pero no lanzas la bola? Explica por qué.
29. Se pueden explicar los ejemplos de los dos ejercicios anteriores en términos de conservación de la cantidad de movimiento y en términos de la tercera ley de Newton. Supongamos que los hayas contestado en términos de la conservación de la cantidad de movimiento, contéstalos en términos de la tercera ley de Newton (o al revés, si los contestaste en términos de la tercera ley de Newton).
30. En el capítulo 5 explicamos la propulsión por cohete en términos de la tercera ley de Newton. Esto es, que la fuerza que impulsa un cohete se debe a que los gases de escape empujan contra el cohete es la reacción a la fuerza que ejerce el cohete sobre los gases de escape. Explica la propulsión a reacción en términos de la conservación de la cantidad de movimiento.
31. Explica cómo la conservación de la cantidad de movimiento es una consecuencia de la tercera ley de Newton.
32. Regresa al ejercicio 22, del capítulo 5, y contéstalo en términos de conservación de la cantidad de movimiento.
33. Tu amigo dice que se infringe la ley de la conservación de la cantidad de movimiento cuando una pelota rueda cuesta abajo y gana cantidad de movimiento. ¿Qué le contestas?
34. Coloca una caja en un plano inclinado, y aumentará su cantidad de movimiento conforme se desliza hacia abajo. ¿Qué es lo que provoca este cambio de cantidad de movimiento?
35. ¿Qué se entiende por sistema y cómo se relaciona con la conservación de la cantidad de movimiento?
36. Si lanzas una pelota hacia arriba, ¿se conserva la cantidad de movimiento de la pelota? ¿Se conserva la cantidad de movimiento del sistema pelota + Tierra? Explica tus respuestas.

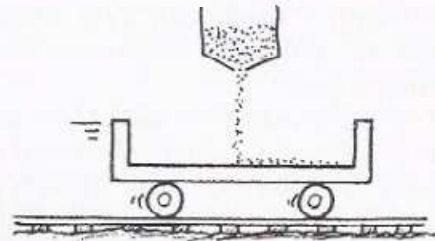


37. La cantidad de movimiento de una manzana que cae al suelo no se conserva porque la fuerza externa de la gravedad actúa sobre ella. Pero la cantidad de movimiento se conserva en un sistema más grande. Explica por qué.
38. Deja caer una piedra desde el borde de un barranco profundo. Identifica el sistema en el que la cantidad neta de movimiento es cero cuando cae la piedra.
39. Un automóvil se desbarranca y choca contra el fondo del cañón. Identifica el sistema en el que la cantidad de movimiento neta sea cero durante el choque.
40. Bronco se lanza desde un helicóptero suspendido en el aire y ve que aumenta su cantidad de movimiento. ¿Infringe esto la conservación de la cantidad de movimiento? Explica por qué.
41. Un velero sobre el hielo se queda inmóvil sobre un lago congelado, en un día sin viento. El tripulante prepara un ventilador como se ve en la imagen. Si todo el aire rebota en la vela y se va hacia atrás, ¿se pondrá en movimiento el velero? En caso afirmativo, ¿en qué dirección?
42. ¿Cambiaría tu respuesta en el ejercicio anterior, si el aire llegara a la vela y se detuviera sin rebotar?
43. Señala la ventaja de simplemente quitar la vela en los ejercicios anteriores.
44. ¿Qué ejerce más impulso sobre una placa de acero: balas de ametralladora que rebotan contra ella, o las mismas balas que se aplastan y se pegan a ella?
45. Conforme lanzas una pelota hacia arriba, ¿hay un cambio en la fuerza normal sobre tus pies? ¿Hay algún cambio cuando atrapas la pelota? (Piensa en hacer esto mientras estás de pie sobre una báscula.)
46. Cuando viajas en tu automóvil a cierta rapidez por una carretera, de repente la cantidad de movimiento de un insecto cambia, al estrellarse en tu parabrisas. En comparación con el cambio de la cantidad de movimiento del insecto, ¿en cuánto cambia la cantidad de movimiento de tu automóvil?
47. Si una pelota de tenis y una bola de bolos chocan en el aire, cada una experimenta la misma magnitud de cambio en la cantidad de movimiento. Sustenta tu respuesta.
48. Si tuvieran un choque de frente un camión Mack y un automóvil Ford Escort, ¿cuál vehículo sentiría la mayor fuerza del impacto? ¿Y el mayor impulso? ¿Y el mayor cambio de cantidad de movimiento? ¿Y la mayor aceleración?
49. ¿Un choque de frente entre dos automóviles sería más perjudicial para los ocupantes, si los vehículos se quedaran unidos o si rebotaran por el impacto?
50. Una carretilla de 0.5 kg en una pista de aire se mueve a 1.0 m/s a la derecha, dirigiéndose hacia una carreti-

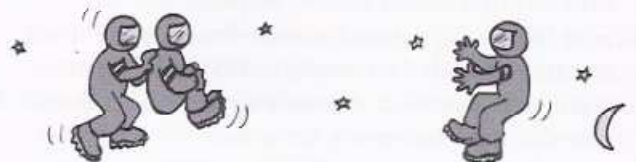


lla de 0.8 kg que se mueve a la izquierda a 1.2 m/s. ¿Cuál es la dirección de la cantidad de movimiento del sistema constituido por las dos carretillas?

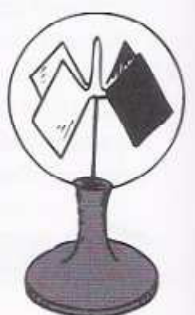
51. Cuando un chorro de arena que cae verticalmente llega a una carretilla que se mueve horizontalmente, ésta desacelera. Ignorando la fricción entre la carretilla y la pista, describe dos razones de esto, una en términos de una fuerza horizontal que actúe sobre la carretilla, y otra en términos de la conservación de la cantidad de movimiento.



52. En una película, el héroe salta en línea recta hacia abajo desde un puente hacia un pequeño bote que continúa moviéndose sin cambiar su velocidad. ¿Qué principio de física se está infringiendo aquí?
53. Supón que hay tres astronautas fuera de una nave espacial, y que van a jugar a las atrapadas. Todos ellos pesan igual en la Tierra, y tienen iguales fuerzas. El primero lanza al segundo hacia el tercero, y comienza el juego. Describe el movimiento de los astronautas conforme avanza el juego. ¿Cuánto tiempo durará el juego?



54. ¿Para lanzar una pelota ejerces algún impulso sobre ella? ¿Ejerces un impulso para atraparla a la misma velocidad? ¿Más o menos qué impulso ejerces, en comparación, si la atrapas y de inmediato la regresas? (Imagínate sobre una patineta.)
55. Con referencia a la figura 6.9, ¿el impulso al impacto diferirá si la mano de Cassy rebotará al golpear los ladrillos? En cualquier caso, ¿cómo se compara la fuerza ejercida sobre los ladrillos con la fuerza ejercida sobre la mano?
56. La luz consiste en "corpúsculos" diminutos llamados *fotones*, que poseen cantidad de movimiento. Eso se puede demostrar con un radiómetro, que se ve abajo. Unas veletas metálicas están pintadas de negro en una cara y de blanco en la otra, y pueden girar libremente en torno a la punta de una aguja montada en el vacío. Cuando los fotones llegan a la superficie negra son absorbidos; y cuando llegan a la superficie blanca, son reflejados.

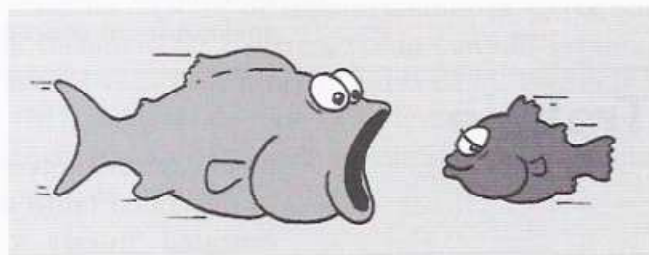


¿En cuál superficie es mayor el impulso de la luz incidente y en qué dirección girarán las veletas? (Giran en la dirección opuesta en los radiómetros más difundidos, donde hay aire dentro de la cámara de vidrio; tu profesor te dirá por qué.)

57. Un deuterón es una partícula nuclear de masa idéntica a la formada por un protón y un neutrón. Supón que se acelera hasta determinada rapidez, muy alta, en un ciclotrón, y que se dirige hacia una cámara de observación, donde choca con una partícula que inicialmente estaba en reposo, y se queda pegada en ella. Se observa que el conjunto se mueve exactamente con la mitad de la rapidez del deuterón incidente. ¿Por qué los observadores dicen que también la partícula que sirvió de blanco es un deuterón?
58. Cuando un núcleo estacionario de uranio sufre la fisión, se rompe y forma dos partes desiguales, que salen despedidas. ¿Qué puedes decir acerca de las cantidades de movimiento de las partes? ¿Qué puedes decir acerca de las rapidezces de las partes?
59. Una bola de billar se detiene cuando choca de frente contra una bola en reposo. Sin embargo la bola no puede detenerse por completo si el choque no es exactamente de frente; esto es, si la segunda bola se mueve formando un ángulo con la trayectoria de la primera. ¿Sabes por qué? (*Sugerencia:* ten en cuenta la cantidad de movimiento antes y después del choque, en la dirección inicial de la primera bola y también en la dirección perpendicular a la dirección inicial.)
60. Tienes un amigo que dice que después de que una pelota de golf choca contra una bola de bolos en reposo, aunque la rapidez que adquiere la bola de boliche es muy pequeña, su cantidad de movimiento es mayor que la cantidad de movimiento inicial de la pelota de golf. Además, tu amigo afirma que eso se debe a la cantidad de movimiento "negativa" de la pelota de golf después del choque. Otro amigo dice que eso es charlatanería, porque así se infringiría la conservación de la cantidad de movimiento. ¿Con quién estás de acuerdo?

por un cinturón de seguridad sobre un maniquí de prueba de 75 kg.

4. Una grúa deja caer por accidente un automóvil de 1,000 kg, y se estrella contra suelo a 30 m/s, deteniéndose en forma abrupta. Se presentan las preguntas *a* y *b*. ¿Cuál se puede contestar con estos datos? Explica por qué. *a*) ¿Qué impulso actúa sobre el automóvil cuando choca? *b*) ¿Cuál es la fuerza de impacto sobre el automóvil?
5. En un juego de béisbol, una pelota de masa $m = 0.15$ kg cae directamente hacia abajo con una rapidez de $v = 40$ m/s, en las manos de un aficionado. ¿Qué impulso Ft debe suministrarse para que se detenga la bola? Si la bola se detiene en 0.03 s, ¿cuál es la fuerza promedio en la mano de quien la atrapa?
6. Judith (40.0 kg de masa) se para sobre hielo resbaladizo y atrapa a su perro (15 kg de masa) saltarín, Atti, que se mueve horizontalmente a 3.0 m/s. ¿Cuál es la rapidez de Judith y su perro después de atraparlo?
7. Una locomotora diesel pesa cuatro veces más que un furgón de carga. Si la locomotora rueda a 5 km/h y choca contra un furgón que inicialmente está en reposo, ¿con qué rapidez siguen rodando los dos después de acoplarse?
8. Un pez de 5 kg nada a 1 m/s cuando se traga a un distraído pez de 1 kg que a su vez nada en sentido contrario, a una velocidad que hace que los dos peces queden parados inmediatamente después del bocado. ¿Cuál es la velocidad v del pez pequeño antes de que se lo traguen?



9. Superman llega a un asteroide en el espacio exterior y lo lanza a 800 m/s, tan rápido como una bala. El asteroide es 1,000 veces más masivo que Superman. En los dibujos animados, se ve que Superman queda inmóvil después del lanzamiento. Si entra la física en este caso, ¿cuál sería su velocidad de retroceso?
10. Dos automóviles, cada uno con 1,000 kg de masa, se mueven con la misma rapidez, 20 m/s, cuando chocan y se quedan pegados. ¿En qué dirección y qué rapidez se moverá la masa, *a*) si uno de ellos iba hacia el norte y el otro hacia el sur?, y *b*) si uno iba hacia el norte y el otro hacia el este (como en la figura 6.18)?

Problemas

1. Determina la fuerza o fricción que actúa sobre una caja de cartón de 50 kg que se desliza a 4 m/s si se detiene en 3 s.
2. *a*) Determina la cantidad de fuerza ejercida sobre una bola de 8 kg que rueda a 2 m/s cuando choca contra una almohada y se detiene en 0.5 s.
b) ¿Cuánta fuerza ejerce la almohada sobre la bola?
3. Un automóvil choca contra un muro a 25 m/s, y se detiene en 0.1 s. Calcula la fuerza promedio ejercida

Energía

Annette Rappleyea usa un péndulo balístico para calcular la rapidez de un balín que se dispara.



Quizás el concepto más importante de toda la ciencia sea la energía. La combinación de energía y materia forma el Universo: la materia es sustancia, en tanto que la energía es lo que mueve la sustancia. Es fácil de entender la idea de materia. La materia es lo que podemos ver, oler y sentir. Tiene masa y ocupa espacio. En cambio, la energía es abstracta; no la vemos, ni la olemos, ni la sentimos la mayoría de las veces. Es sorprendente que Isaac Newton no conociera la idea de energía, y que todavía se debatiera su existencia en la década de 1850. Aunque la energía nos es muy familiar, resulta difícil definirla, porque no sólo es una "cosa", sino que es una cosa y un proceso a la vez, algo así como si fuera a la vez un sustantivo y un verbo. Las personas, los lugares y las cosas tienen energía, aunque normalmente observamos la energía sólo cuando se transfiere o se transforma. Nos llega en forma de ondas electromagnéticas del Sol, y la sentimos como energía térmica; es captada por las plantas y une las moléculas de la materia; está en el alimento que comemos y la recibimos a través de la digestión. Incluso la materia misma es energía condensada y embotellada, como se estableció en la célebre fórmula de Einstein, $E = mc^2$, a la cual regresaremos en la última parte de este libro. Por ahora comenzaremos nuestro estudio de la energía analizando un concepto relacionado: *el trabajo*.

Trabajo



La palabra *trabajo*, en el uso común, significa esfuerzo físico o mental. No confundas la definición de trabajo en física con la noción cotidiana de trabajo.

¡EUREKA!

En el capítulo anterior explicamos que los cambios en el movimiento de un objeto dependen tanto de la fuerza como de "cuánto tiempo" actúa la fuerza. A la cantidad "fuerza $\times$ tiempo" la llamamos *impulso*. Sin embargo, no siempre "cuánto tiempo" equivale a tiempo. También puede significar distancia. Cuando se considera la expresión fuerza $\times$ distancia se habla de una cantidad totalmente distinta: el *trabajo*.

Cuando levantamos una carga contra la gravedad terrestre, hacemos trabajo. Cuanto más pesada sea la carga, o cuanto más alto la levantemos, realizaremos mayor trabajo. Siempre que se efectúa trabajo vienen a colación dos cuestiones: 1. la aplicación de una fuerza y 2. el movimiento de algo debido a esa fuerza. Para el caso más sencillo, cuando la fuerza es constante y el movimiento es en línea recta y en dirección de la fuerza, el trabajo efectuado por una fuerza aplicada¹

¹ En el caso más general, el trabajo es el producto sólo del componente de la fuerza que actúa en dirección del movimiento, por la distancia recorrida. Por ejemplo, cuando una fuerza actúa en un ángulo respecto a la dirección del movimiento, el componente de la fuerza paralela al movimiento se multiplica por la distancia recorrida. En cambio cuando una fuerza actúa en ángulo recto a la dirección del movimiento, sin un componente de la fuerza que esté en la dirección del movimiento, no se realiza trabajo. Un ejemplo común es el de un satélite en órbita circular: la fuerza de gravedad está en ángulo recto con su trayectoria circular y no se efectúa trabajo en el satélite. En consecuencia, éste sigue en órbita sin cambiar de rapidez.

sobre un objeto se define como el producto de la fuerza por la distancia que se mueve el objeto. En forma abreviada:

$$\text{Trabajo} = \text{fuerza} \times \text{distancia}$$

$$T = Fd$$

Si subimos un piso con dos cargas, hacemos el doble de trabajo que si lo subimos sólo con una, porque la *fuerza* necesaria para subir el doble de peso es del doble también. Asimismo, si subimos dos pisos con una carga, en vez de un piso, hacemos el doble de trabajo porque la *distancia* es del doble.

Vemos que en la definición de trabajo intervienen tanto una fuerza como una distancia. Un atleta que sujeta sobre su cabeza unas pesas de 1,000 N no hace trabajo sobre las pesas. Se puede cansar de hacerlo, pero si las pesas no se mueven por la fuerza que él haga, no hace trabajo *sobre las pesas*. Se puede hacer trabajo sobre los músculos, los cuales se estiran y se contraen, y ese trabajo es la fuerza por la distancia, en una escala biológica; pero ese trabajo no se hace sobre las pesas. Sin embargo, el levantar las pesas es distinto. Cuando el atleta sube las pesas desde el piso, sí efectúa trabajo.

Por lo general, el trabajo cae en dos categorías. Una de éstas es el trabajo que se realiza contra otra fuerza. Cuando un arquero estira la cuerda del arco, realiza trabajo contra las fuerzas elásticas de este último. De manera similar, cuando se eleva el pilón de un martinete, se requiere trabajo para levantar el pilón contra la fuerza de gravedad. Cuando alguien hace "lagartijas", realiza trabajo contra su propio peso. Se efectúa trabajo sobre algo cuando se le hace moverse contra la influencia de una fuerza que se opone, la cual a menudo es la fricción.

La otra categoría de trabajo es el que se efectúa para cambiar la rapidez de un objeto. Esta clase de trabajo se hace al acelerar o al desacelerar un automóvil. En ambas categorías, el trabajo implica una transferencia de energía.

En la unidad de medición del trabajo se combinan una unidad de fuerza (N) con una unidad de distancia (m); la unidad de trabajo es el newton-metro (N·m), que también se llama *joule* (J). Se efectúa un joule de trabajo cuando se ejerce una fuerza de 1 newton durante una distancia de 1 metro, como cuando levantas una manzana sobre tu cabeza. Para los valores grandes se habla de kilojoules (kJ, miles de joules) o de megajoules (MJ, millones de joules). El levantador de pesas de la figura 7.1 efectúa kilojoules de trabajo. Detener un camión de carga que viaja a 100 km/h requiere megajoules de trabajo.



FIGURA 7.1
Se efectúa trabajo para levantar las pesas.



FIGURA 7.2
Puede gastar energía al empujar el muro, pero si no lo mueve, no se efectúa trabajo sobre el muro.

Potencia

En la definición de trabajo no se dice cuánto tiempo se emplea para realizar el trabajo. Se efectúa la misma cantidad de trabajo al subir una carga por un tramo de escaleras si se camina o si se corre. Entonces, ¿por qué nos cansamos más al subir las escaleras apresuradamente, en unos cuantos segundos, que al subirlas durante algunos minutos? Para entender tal diferencia necesitamos hablar de una medida de qué tan rápido se hace el trabajo; es la *potencia*. La **potencia** es igual a la cantidad de trabajo efectuado entre el tiempo en el que se efectúa:

$$\text{Potencia} = \frac{\text{trabajo efectuado}}{\text{intervalo de tiempo}}$$

Un motor de gran potencia puede efectuar trabajo con rapidez. Un motor de automóvil que tenga el doble de potencia que otro no necesariamente produce el doble de trabajo ni hace que el automóvil avance al doble de velocidad que un



FIGURA 7.3

Los tres motores principales de un trasbordador espacial pueden desarrollar 33,000 MW de potencia, al quemar combustible a la formidable tasa de 3,400 kg/s. Es como vaciar una alberca mediana en 20 s.

motor con menos potencia. El doble de potencia quiere decir que podemos hacer la misma cantidad de trabajo en la mitad del tiempo, o el doble de trabajo en el mismo tiempo. Un motor más potente acelera un automóvil hasta determinada rapidez en menor tiempo que un motor menos potente.

Veamos otra forma de considerar la potencia: un litro (L) de combustible puede efectuar cierta cantidad de trabajo, pero la potencia que se produce cuando lo quemamos tomaría cualquier valor, que depende de lo *rápido* que se queme. Puede hacer trabajar una podadora de césped durante media hora, o un motor de reacción durante medio segundo.

La unidad de la potencia es el joule por segundo (J/s), que también se llama watt (en honor de James Watt, el ingeniero que desarrolló la máquina de vapor en el siglo XVIII). Un watt (W) de potencia se ejerce cuando se realiza un trabajo de 1 joule en 1 segundo. Un kilowatt (kW) es igual a 1,000 watts. Un megawatt (MW) equivale a 1 millón de watts. En Estados Unidos se acostumbra evaluar los motores de combustión en caballos de fuerza; y los aparatos eléctricos, en kilowatts. No obstante se puede usar cualquiera de las dos unidades. En el sistema métrico, los automóviles se clasifican en kilowatts. (Un caballo de fuerza equivale a las tres cuartas partes de un kilowatt, por lo que un motor de 134 caballos de fuerza es de 100 kW.)

EXAMÍNA TE

Cuando un montacargas se reemplaza por uno nuevo que tiene el doble de potencia, ¿cuánta mayor carga podrá levantar en el mismo periodo de tiempo? Si levanta la misma carga, ¿qué tanto más rápido opera?

Energía mecánica

Cuando un arquero efectúa trabajo al tensar un arco, el arco tensado tiene la capacidad de realizar trabajo sobre la flecha. Cuando se hace trabajo para levantar el pesado pilón de un martinete, el pilón tiene la capacidad de efectuar trabajo sobre el objeto que golpea cuando cae. Cuando se efectúa trabajo al hacer girar un mecanismo de cuerda, la cuerda adquiere la capacidad de efectuar trabajo sobre los engranajes que impulsan un reloj, haciendo sonar una campana o una alarma.

En cada caso se ha adquirido algo que permite al objeto efectuar trabajo. Ese “algo” podría ser una compresión de átomos en el material de un objeto, una separación física de objetos que se atraen o un reacomodo de cargas eléctricas en las moléculas de una sustancia. Este “algo” que permite a un objeto efectuar trabajo es la **energía**.² Al igual que el trabajo, la energía se expresa en joules. Aparece en muchas formas, las cuales describiremos en los siguientes capítulos. Por ahora nos enfocaremos en las formas más comunes de energía mecánica, que es la forma de

COMPRUEBA TU RESPUESTA

El montacargas que tiene el doble de potencia levantará el doble de la carga en el mismo tiempo o la misma carga en la mitad del tiempo. De cualquier forma, el dueño del nuevo montacargas estará muy contento.

² Estrictamente hablando, lo que permite que un objeto efectúe trabajo es su energía disponible, porque no toda la energía de un objeto se puede transformar en trabajo.

energía debida a la posición o el movimiento de algo. La energía mecánica puede estar en forma de energía potencial, de energía cinética o de la suma de ambas.

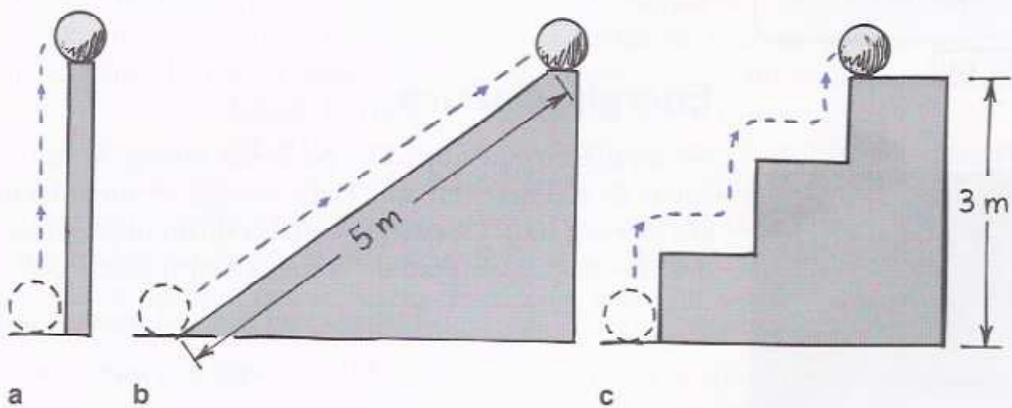
Energía potencial

Un objeto puede almacenar energía gracias a su posición. A la energía que se almacena y está lista para utilizarse se le llama **energía potencial (EP)**, ya que en su estado almacenado tiene el potencial de efectuar trabajo. Por ejemplo, un resorte estirado o comprimido tiene el potencial de hacer trabajo. Cuando se tensa un arco, éste almacena energía. Una banda de goma estirada tiene energía potencial debido a su posición relativa con respecto a las partes, porque si es parte de una resorte, es capaz de efectuar trabajo.

La energía química de los combustibles también es energía potencial, ya que en realidad es energía de posición en el nivel microscópico. Está disponible cuando se alteran las posiciones de las cargas eléctricas dentro y entre las moléculas; esto es, cuando se produce un cambio químico. Cualquier sustancia que pueda efectuar trabajo por medio de acciones químicas posee energía potencial. Esta energía caracteriza los combustibles fósiles, los acumuladores eléctricos y el alimento que ingerimos.

FIGURA 7.4

La energía potencial de la esfera de 10 N es igual (30 J) en los tres casos, porque el trabajo que se efectúa para subirla 3 m es el mismo si a) se eleva con 10 N de fuerza, b) se empuja hacia arriba con una fuerza de 6 N por el plano inclinado de 5 m, o c) si se sube con 10 N por escalones de 1 m. No se efectúa trabajo para moverla horizontalmente (sin tomar en cuenta la fricción).



Se requiere trabajo para elevar objetos en contra de la gravedad terrestre. La energía potencial de un cuerpo a causa de su posición elevada se llama **energía potencial gravitacional**. El agua de una presa y el pilón de un martinete tienen energía potencial gravitacional. Siempre que se realice trabajo, cambia la energía.

La cantidad de energía potencial gravitacional que tiene un objeto elevado es igual al trabajo realizado para elevarlo en contra de la gravedad. El trabajo efectuado es igual a la fuerza necesaria para moverlo hacia arriba, por la distancia vertical que sube (recuerda que $T = Fd$). Una vez que comienza el movimiento hacia arriba, la fuerza hacia arriba para mantenerlo en movimiento a velocidad constante es igual al peso, mg , del objeto. Entonces, el trabajo efectuado para subirlo a una altura h es el producto mgh .

$$\text{Energía potencial gravitacional} = \text{peso} \times \text{altura}$$

$$EP = mgh$$

Observa que la altura es la distancia arriba de un nivel de referencia elegido, por ejemplo el suelo o el piso de un edificio. La energía potencial gravitacional, mgh , es relativa a ese nivel, y sólo depende de mg y de h . En la figura 7.4 puedes ver que la energía potencial de la esfera elevada no depende de la trayectoria que siguió para subir.

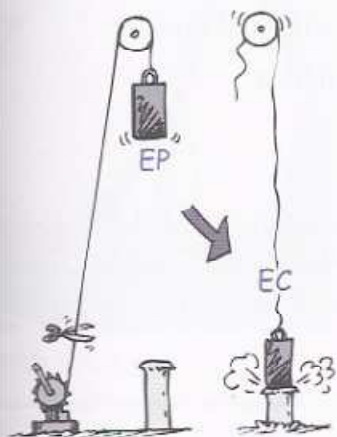


FIGURA 7.5

La energía potencial del pilón subido se convierte en energía cinética cuando se suelta.



FIGURA 7.6

Ambos realizan el mismo trabajo para subir el bloque.



Peso = mg , así que un bloque de hielo de 10 kg pesa 10 N.

¡EUREKA!



FIGURA 7.7

La energía potencial del arco tenso de Tenny es igual al trabajo (fuerza promedio $\times$ distancia) que efectuó al retrasar la flecha hasta su posición de disparo. Cuando la suelta, la mayoría de la energía potencial del arco tensado se transformará en energía cinética de la flecha.

La energía potencial, sea gravitacional o cualquiera otra, tiene importancia sólo cuando *cambia*, es decir, cuando efectúa trabajo o se transforma en energía de alguna otra forma. Por ejemplo, si la esfera de la figura 7.4 cae desde su posición elevada y efectúa 20 joules de trabajo al llegar abajo, entonces perdió 20 joules de energía potencial. No importa la energía potencial *total* que tenga la esfera cuando se elevó, respecto a algún nivel de referencia. Lo que interesa es la cantidad de energía potencial que se convierte en alguna otra forma. Sólo tienen significado los *cambios* de energía potencial. Una de las formas de energía en que se puede transformar la energía potencial es energía de movimiento, o *energía cinética*.

EXAMÍNATE

1. ¿Cuánto trabajo se efectúa al levantar el bloque de hielo de 100 N una distancia vertical de 2 m, como se muestra en la figura 7.6?
2. ¿Cuánto trabajo se efectúa al empujar hacia arriba el mismo bloque de hielo por la rampa de 4 m de longitud? (La fuerza necesaria es de tan sólo 50 N, que es la razón por la cual se utilizan las rampas.)
4. ¿Cuál es el aumento en la energía potencial gravitacional del bloque en cada caso?

Energía cinética

Si empujamos un objeto lo podemos mover. Si un objeto se mueve, entonces, es capaz de efectuar trabajo. Tiene energía de movimiento y decimos que tiene *energía cinética* (EC). La *energía cinética* de un objeto depende de su masa y de su rapidez. Es igual a la mitad de la masa multiplicada por el *cuadrado* de la rapidez.

$$\text{Energía cinética} = \frac{1}{2} \text{ masa} \times \text{rapidez}^2$$

$$EC = \frac{1}{2} mv^2$$

Cuando lanzas una pelota, realizas trabajo sobre ella para darle rapidez cuando sale de tu mano. Entonces, la pelota en movimiento podrá golpear algo y empujarlo, haciendo trabajo sobre eso que golpea. La energía cinética de un objeto en movimiento es igual al trabajo requerido para llevarlo desde el reposo hasta esa rapidez, o al trabajo que el objeto puede realizar mientras llega al reposo:

$$\text{Fuerza neta} \times \text{distancia} = \text{energía cinética}$$

o, en forma de ecuación,

$$Fd = \frac{1}{2} mv^2$$

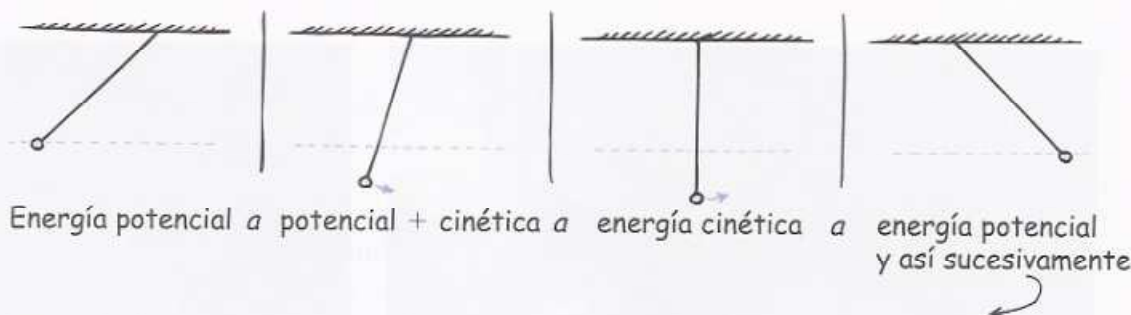
Observa que la rapidez está al cuadrado, de manera que si la rapidez de un objeto se duplica, su energía cinética se cuadruplica ($2^2 = 4$). En consecuencia, para duplicar la rapidez, habrá que multiplicar el trabajo por 4. Siempre que se realiza trabajo, la energía cambia.

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. $T = Fd = 100 \text{ N} \times 2 \text{ m} = 200 \text{ J}$.
2. $T = Fd = 50 \text{ N} \times 4 \text{ m} = 200 \text{ J}$.
3. En cualquier caso la energía potencial del bloque se incrementa en 200 J. La rampa tan sólo hace que el trabajo sea más fácil de realizar.

FIGURA 7.8

Transiciones de la energía en un péndulo. La EP es en relación con el punto mas bajo del péndulo, cuando está vertical.



Bola de boliche y conservación de la energía

Teorema del trabajo y la energía

Cuando un automóvil acelera, su aumento de energía cinética se debe al trabajo que se efectúa sobre él. También, cuando desacelera, se efectúa trabajo para reducir su energía cinética. Entonces, se puede decir que³

$$\text{Trabajo} = \Delta \text{EC}$$

El trabajo es igual al *cambio* de energía cinética. Éste es el **teorema del trabajo y la energía**. En esta ecuación el trabajo es el trabajo *neto*, es decir, el trabajo basado en la fuerza neta. Por ejemplo, si empujas un objeto y también la fricción actúa sobre el objeto, el cambio de energía cinética es igual al trabajo efectuado por la fuerza neta, que es tu empuje menos la fricción. En este caso, sólo parte del trabajo total que haces cambia la energía cinética del objeto. El resto se transforma en calor gracias a la fricción. Si la fuerza de fricción es igual y opuesta a tu empuje, la fuerza neta sobre el objeto es cero, y no se hace trabajo neto. Entonces, el cambio de la energía cinética del objeto es cero.

El teorema del trabajo y la energía también se aplica cuando disminuye la rapidez. Cuando oprimas el pedal del freno en un automóvil y lo haces patinar, es porque el asfalto hace trabajo sobre el vehículo. El trabajo es la fuerza de fricción multiplicada por la distancia durante la cual actúa esa fuerza de fricción.

Es interesante que la fuerza de fricción entre un neumático que derrapa y el asfalto es igual cuando el automóvil se mueve despacio o aprisa. En un frenado de emergencia con frenos antibloqueo, la única forma de que los frenos hagan más trabajo es que actúen en una distancia mayor. Un automóvil que avanza con el doble de rapidez que otro requiere cuatro veces ($2^2 = 4$) más trabajo para detenerse. Puesto que la fuerza de fricción es casi la misma para ambos vehículos, el que avanza más rápido necesita cuatro veces más distancia para detenerse. La misma regla se aplica a los frenos de modelo más antiguo que pueden bloquear las llantas. La fuerza de fricción en el neumático que se patina es también casi independiente de la rapidez. En las investigaciones de los accidentes se tiene muy en cuenta que un automóvil que viaja a 100 kilómetros por hora, con una energía cinética cuatro veces mayor que si fuera a 50 kilómetros por hora, patinará cuatro veces más lejos, en una frenada de emergencia. La energía cinética depende de la rapidez *al cuadrado*.

Los frenos de un automóvil convierten la energía cinética en calor. Los conductores profesionales están familiarizados con otra forma de frenar un vehículo: cambiar la palanca de velocidades a una velocidad más baja y dejar que el motor frene. Los automóviles híbridos actuales hacen lo mismo y desvían la energía de frenado a la batería eléctrica de almacenamiento, donde se utiliza para complementar la energía generada por la combustión de la gasolina. (El capítulo 25 explica cómo logran esto.) ¡Bravo por los automóviles híbridos!

³ Esto se puede deducir como sigue: si multiplicamos los dos lados de $F = ma$ (la segunda ley de Newton) por d , obtenemos $Fd = mad$. Recuerda que en el capítulo 3, para la aceleración constante $d = \frac{1}{2}at^2$, por lo que se puede decir que $Fd = m(\frac{1}{2}at^2) = \frac{1}{2}maat^2 = \frac{1}{2}m(at)^2$; y al sustituir $\Delta v = at$, se obtiene $Fd = \Delta \frac{1}{2}mv^2$. Esto es, $\text{trabajo} = \Delta \text{EC}$.

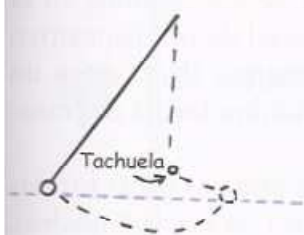


FIGURA 7.9

Figura interactiva

La lenteja del péndulo oscilará hasta su altura original, haya tachuela o no.



FIGURA 7.10

La "caída" cuesta abajo de la montaña rusa produce una rapidez vertiginosa, y esta energía cinética la utiliza el carro para subir por la empinada pista que conduce a la siguiente joroba.

**FIGURA 7.11**

Debido a la fricción, la energía se transfiere tanto al piso como a la llanta, cuando la bicicleta se derrapa al frenar. Una cámara infrarroja revela la marca caliente que deja la llanta (la raya que se observa en el piso, en la imagen izquierda) y el calentamiento de la llanta (imagen derecha). (Cortesía de Michael Vollmer.)

El teorema del trabajo y la energía se aplica más allá de los cambios en la energía cinética. El trabajo puede cambiar la energía potencial de un dispositivo mecánico, la energía térmica de un sistema térmico, o la energía eléctrica en un aparato eléctrico. El trabajo no es una forma de energía, sino una forma de transferir energía de un lugar a otro, o de una forma a otra.⁴

La energía cinética y la energía potencial son dos entre muchas otras formas de energía, y son la base de algunas como la energía química, la energía nuclear, el sonido y la luz. La energía cinética promedio del movimiento molecular aleatorio se relaciona con la temperatura; la energía potencial de las cargas eléctricas con el voltaje; y las energías cinética y potencial del aire en vibración definen la intensidad del sonido. Hasta la luz se origina en el movimiento de los electrones dentro de los átomos. Toda forma de energía puede transformarse en cualquier otra forma.

EXAMÍNAME

1. Cuando estás conduciendo un automóvil a 90 km/h, ¿qué tanta distancia necesitarías para detenerte comparada con la necesaria si fueras conduciendo a 30 km/h?
2. ¿Puede tener energía un objeto?
3. ¿Puede tener trabajo un objeto?

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Nueve veces más lejos. El vehículo tiene nueve veces más energía cinética cuando se desplaza tres veces más aprisa $\frac{1}{2}m(3v)^2 = \frac{1}{2}m9v^2 = 9(\frac{1}{2}mv^2)$. La fuerza de fricción comúnmente será la misma en ambos casos; por consiguiente, para hacer nueve veces el trabajo se requiere nueve veces esa distancia.
2. Sí, pero en un sentido relativo. Por ejemplo, un objeto elevado podría tener EP relativa al suelo, pero no relativa a un punto a la misma elevación. De manera similar, la EC que tiene un objeto es con respecto a un marco de referencia, usualmente la superficie terrestre. (Veremos que los objetos materiales tienen *energía de ser*, $E = mc^2$, la energía congelada que forma su masa.) ¡Investiga más!
3. No, a diferencia de la cantidad de movimiento o de la energía, el trabajo no es algo que *tenga* un objeto. El trabajo es algo que *hace* un objeto a otro objeto. Un objeto puede *hacer* trabajo sólo si tiene energía.

⁴ El teorema de trabajo y energía también puede formularse como Trabajo = $\Delta E + Q$, donde Q es la energía transferida debido la diferencia de temperatura.

Conservación de la energía

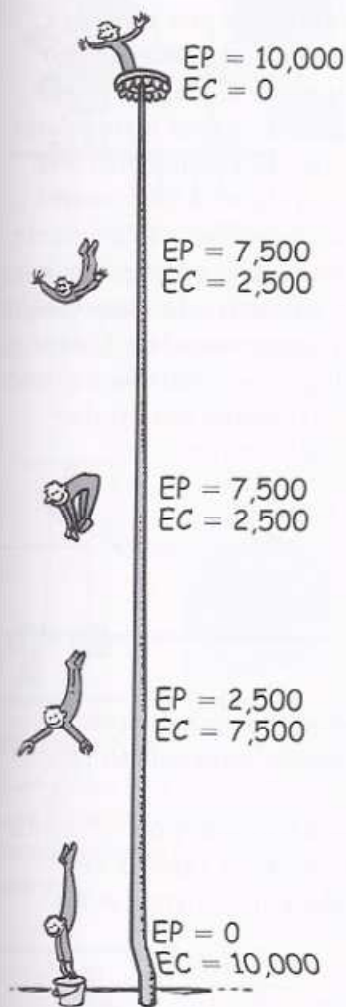


FIGURA 7.12

Figura interactiva

En el circo un acróbata en la cúspide de un poste tiene una energía potencial de 10,000 J. Al lanzarse su energía potencial se convierte en energía cinética. Observa que en las posiciones sucesivas a la cuarta parte, mitad, tres cuartos y la bajada completa, la energía total es constante. (Adaptada de K. F. Kuhn y J. S. Faughn, *Physics in Your World*, Filadelfia: Saunders, 1980.)

Más importante que saber *qué es la energía* es entender cómo se comporta: *cómo se transforma*. Comprenderemos mejor los procesos y los cambios que suceden en la naturaleza si los analizamos en términos de *cambios* de energía, es decir, transformaciones de una a otra forma, o de transferencias de energía de un lugar a otro. La energía es la forma que tiene la naturaleza de llevar la cuenta.

Examinemos los cambios de energía cuando trabaja el martinete de la figura 7.5. El trabajo efectuado para subir el pilón y darle energía potencial se transforma en energía cinética cuando se suelta el pilón. Esta energía se transfiere al pilote que está abajo de él. La distancia que se suma al pilote en el terreno, multiplicada por la fuerza promedio del impacto, es casi igual a la energía potencial inicial del pilón. Decimos *casi*, porque algo de la energía se emplea en calentar el terreno y el pilón durante la penetración. Si se tiene en cuenta la energía térmica, se ve que la energía se transforma sin pérdida ni ganancia neta. ¡Notable!

El estudio de las diversas formas de energía y sus transformaciones entre sí ha conducido a una de las grandes generalizaciones de la física: la ley de la **conservación de la energía**:

La energía no se puede crear ni destruir; se puede transformar de una forma a otra, pero la cantidad total de energía nunca cambia.

Cuando examinamos cualquier sistema en su totalidad, sea tan sencillo como un péndulo que oscila o tan complejo como una supernova que explota, hay una cantidad que no se crea ni se destruye: la energía. Puede cambiar de forma, o tan sólo se puede transferir de un lugar a otro; pero hasta donde sabemos, la cuenta total de la energía permanece igual. Esta cuenta de energía considera el hecho de que los átomos que forman la materia son en sí mismos paquetes de energía concentrada. Cuando los núcleos de los átomos se reacomodan son capaces de liberar grandes cantidades de energía. El Sol brilla porque algo de su energía nuclear se transforma en energía radiante.

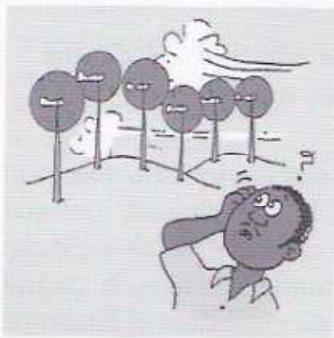
La compresión enorme debida a la gravedad, y las temperaturas extremadamente altas en lo más profundo del Sol funden los núcleos de los átomos de hidrógeno y forman núcleos de helio. Se trata de la *fusión termonuclear*, proceso que libera energía radiante, y una pequeña parte de ella llega a la Tierra. Parte de la energía que llega a la Tierra la absorben las plantas (y otros organismos fotosintéticos) y, a la vez, parte de ella se almacena en el carbón. Otro tanto sostiene la vida en la cadena alimenticia que comienza con las plantas (y otros organismos fotosintetizadores), y parte de esta energía se almacena después en forma de petróleo. Algo de la energía solar se consume al evaporar agua de los mares, y parte de esa energía regresa a la Tierra en forma de lluvia que puede regularse en una presa. En virtud de su posición elevada, el agua detrás de la presa tiene energía que sirve para impulsar una planta generadora abajo de la presa, donde se transformará en energía eléctrica. Esta energía viaja por líneas de transmisión hasta los hogares, donde se usa para el alumbrado, la calefacción, la cocina y para hacer funcionar diversos aparatos electrodomésticos. ¡Qué maravilla es que la energía se transforme de una a otra forma!

ENERGÍA Y TECNOLOGÍA

Trata de imaginar cómo sería la vida antes de que los seres humanos controlaran la energía. Imagínate la vida doméstica sin luz eléctrica, refrigeradores, sistemas de calefacción y de aire acondicionado, teléfonos, radios y TV, por no mencionar el automóvil de la familia. Quizá pensemos que una vida así sería romántica y mejor sin estas cosas; pero sólo cuando no tenemos en cuenta las horas del día que llevaría lavar la ropa, cocinar y calentar el hogar. También habría que no tener en cuenta lo difícil que era conseguir un doctor en una emergencia antes de que llegara el teléfono. Y en aquellos días el doctor casi no contaba más que con su maletín con laxantes, aspirinas y píldoras dulces; las muertes de niños eran impactantes.

Estamos tan acostumbrados a las ventajas de la tecnología que sólo apenas percibimos nuestra dependencia

de presas, plantas eléctricas, transporte masivo, electrificación, medicina y agricultura modernas, tan sólo para existir. Cuando nos deleitamos con un platillo exquisito casi no pensamos en la tecnología que se empleó en el crecimiento, cosecha y abastecimiento de sus ingredientes para tenerlo en nuestra mesa. Cuando encendemos una lámpara reparamos poco en la red eléctrica con control centralizado que enlaza a centrales generadoras mediante largas líneas de transmisión. Estos cables proporcionan electricidad: la fuerza vital de la industria, el transporte y la mirada de comodidades de nuestra sociedad. Quien piense que la ciencia y la tecnología son "inhumanas" no capta cabalmente las formas en las cuales nos ayudan para desarrollar nuestro potencial humano.



PREGUNTAS DE DESAFÍO

1. ¿Un automóvil consume más combustible cuando se enciende su aire acondicionado? ¿Cuándo se encienden los faros? ¿Cuándo estando estacionado se enciende la radio?
2. En diversos lugares ventosos se ven filas de generadores accionados por el viento producir energía eléctrica. ¿La electricidad que generan afecta la rapidez del viento? Es decir, ¿atrás de los "molinos de viento" habría más viento si no estuvieran allí?

Máquinas

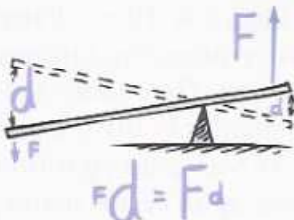


FIGURA 7.13
La palanca.

Una máquina es un dispositivo para multiplicar fuerzas o, simplemente, para cambiar la dirección de éstas. El principio básico de cualquier máquina es el concepto de **conservación de la energía**. Veamos el caso de la más sencilla de las máquinas: la **palanca** (figura 7.13). Al mismo tiempo que efectuamos trabajo en un extremo de la palanca, el otro extremo efectúa trabajo sobre la carga. Se ve que cambia la dirección de la fuerza, porque si empujamos hacia abajo, la carga sube. Si el calentamiento debido a las fuerzas de fricción es tan pequeño que se ignora, el trabajo de entrada será igual al trabajo de salida.

$$\text{Trabajo de entrada} = \text{trabajo de salida}$$

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. La respuesta a las tres preguntas es **sí**, porque en última instancia la energía que consumen proviene del combustible. Aun la energía que suministra el acumulador se le debe regresar a través del alternador, al cual hace girar el motor que trabaja con la energía del combustible. ¡No hay comidas gratis!
2. Los molinos de viento generan potencia tomando EC del viento, por lo que el viento se desacelera en su interacción con las aspas del molino. De manera que **sí**; detrás de los molinos habría más viento si no estuvieran allí.

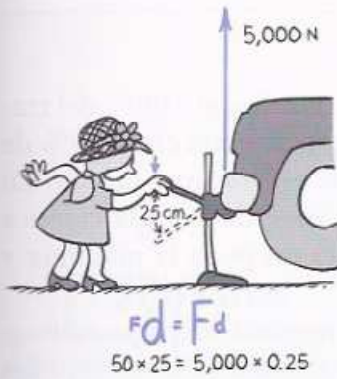


FIGURA 7.14

Fuerza aplicada $\times$ distancia aplicada = fuerza producida $\times$ distancia producida.

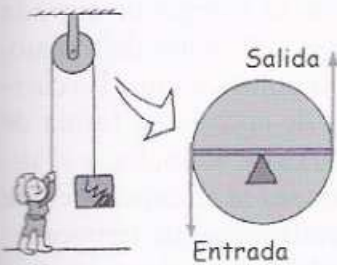


FIGURA 7.15

Esta polea funciona como una palanca. Solo cambia la dirección de la fuerza de entrada.

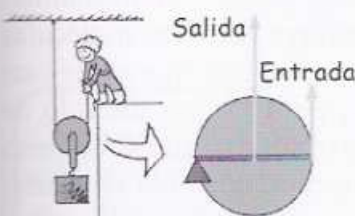
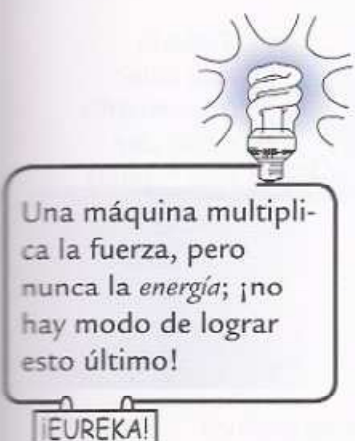


FIGURA 7.16

En este dispositivo se puede subir una carga con la mitad de la fuerza de entrada.



Como el trabajo es igual a la fuerza por la distancia, fuerza de entrada $\times$ distancia de entrada = fuerza de salida $\times$ distancia de salida.

$$(\text{Fuerza} \times \text{distancia})_{\text{entrada}} = (\text{fuerza} \times \text{distancia})_{\text{salida}}$$

El punto de apoyo respecto al cual gira una palanca se llama simplemente *apoyo* o *fulcro*. Cuando el punto de apoyo de una palanca está relativamente cerca de la carga, una fuerza de entrada pequeña producirá una fuerza de salida grande. Esto se debe a que la fuerza de entrada se ejerce en una distancia grande, y la carga se mueve sólo una distancia corta. Entonces una palanca puede ser un multiplicador de fuerza. ¡Pero ninguna máquina puede multiplicar ni el trabajo ni la energía. ¡Esto último es una negación absoluta debida a la conservación de la energía!

Arquímedes, el famoso científico griego del siglo III A. C., entendió muy bien el principio de la palanca. Dijo que podría mover el mundo si tuviera un punto de apoyo adecuado.

En la actualidad un niño puede aplicar el principio de la palanca para levantar el frente de un automóvil usando un gato: ejerciendo una fuerza pequeña durante una distancia grande es capaz de producir una gran fuerza que actúe durante una distancia pequeña. Examina el ejemplo ideal de la figura 7.14. Cada vez que baja 25 cm la manija del gato, el automóvil sube sólo la centésima parte; pero con una fuerza 100 veces mayor.

Otra máquina simple es la polea. ¿Puedes ver que es una “palanca disfrazada”? Cuando se usa como en la figura 7.15 únicamente cambia la dirección de la fuerza; sin embargo, cuando se usa como en la figura 7.16, aumenta al doble la fuerza obtenida. Aumenta la fuerza y disminuye la distancia del movimiento. Como en cualquier máquina, pueden cambiar las fuerzas, aunque el trabajo que entra y el que sale no cambian.

Un aparejo o garrucha es un sistema de poleas que multiplica la fuerza más de lo que puede hacer una sola polea. Con el sistema ideal de poleas de la figura 7.17, el hombre tira 7 metros de una cuerda con una fuerza de 50 newton, y sube 500 newton una distancia vertical de 0.7 metros. La energía que gasta el hombre en tirar de la cuerda es numéricamente igual a la mayor energía potencial del bloque de 500 newtons. La energía se transfiere del hombre a la carga.

Toda máquina que multiplique una fuerza lo hace a expensas de la distancia. Asimismo, toda máquina que multiplica la distancia, como en el caso de tu antebrazo y el codo, lo hace a expensas de la fuerza. Ninguna máquina o mecanismo puede dar más energía que la que le entra. Ninguna máquina puede crear energía; sólo la transfiere o la transforma de una forma a otra.

FIGURA 7.17

Fuerza aplicada $\times$ distancia aplicada = fuerza producida $\times$ distancia producida.



Eficiencia

En los tres ejemplos anteriores se describieron *máquinas ideales*; el 100% del trabajo que les entra apareció a la salida. Una máquina ideal trabajaría con 100% de eficiencia. Eso no sucede en la práctica, y nunca se puede esperar que suceda. En cualquier transformación se disipa algo de energía en forma de energía cinética molecular, que es la energía térmica. Esta última calienta un poco la máquina y sus alrededores.

Hasta una palanca que gire en su punto de apoyo convierte una pequeña fracción de la energía de entrada en energía térmica. Podremos efectuar en ella 100 joules de trabajo, y obtener de ella 98 joules de trabajo. En ese caso, la palanca es eficiente en 98%, y sólo se degradan 2 joules de trabajo en forma de energía térmica. Si la niña de la figura 7.12 efectúa 100 joules de trabajo y aumenta la energía potencial del coche en 60 joules, el gato tiene una eficiencia de 60%; 40 joules de los que se le aplicaron se gastaron en la fricción, y aparecieron como energía térmica.

En un sistema de poleas una fracción considerable de la energía de entrada suele convertirse en energía térmica. Si se efectúan sobre él 100 joules de trabajo, las fuerzas de fricción actúan en las distancias de giro de las poleas, ya que las cuerdas se frotan contra sus ejes; y pueden disipar 60 joules de energía en forma de energía térmica. En ese caso, la producción de trabajo sólo es de 40 joules, y el sistema de poleas tiene una eficiencia de 40%. Cuanto menor sea la eficiencia de una máquina, será mayor el porcentaje de energía que se degrada a energía térmica.

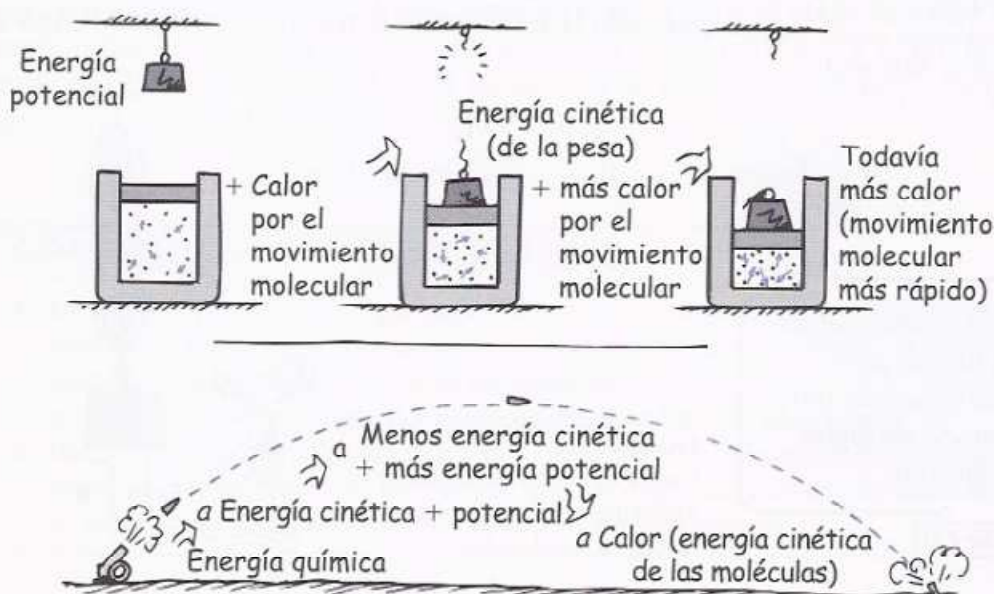
Se presentan ineficiencias siempre que se transforma la energía de una forma a otra en el mundo que nos rodea. La **eficiencia** o **rendimiento** se puede expresar con la relación

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{energía útil producida}}{\text{energía total alimentada}}$$

Un motor de automóvil es una máquina que transforma la energía química almacenada en el combustible, en energía mecánica. Los enlaces entre las moléculas del hidrocarburo se rompen cuando se quema el combustible. Los átomos de carbono del mismo se combinan con el oxígeno del aire, para formar dióxido de carbono, y los átomos de hidrógeno del combustible se combinan con el oxígeno para formar agua, y así se desprende energía. Sería estupendo que toda esta energía se pudiera convertir en energía mecánica útil, esto es, nos gustaría un motor que fuera 100% eficiente. Eso, sin embargo, es imposible porque gran parte de la

FIGURA 7.18

Transiciones de energía. La tumba de la energía cinética es la energía térmica.



energía se transforma en energía térmica, y de ella se usa un poco para mantener calientes a los pasajeros durante el invierno, aunque la mayoría se desperdicia. Algo de ella sale en los gases de escape y algo se disipa al aire a través del sistema de enfriamiento, o directamente desde las partes calientes del motor.⁵

PREGUNTA DE DESAFÍO

Imagínate un automóvil maravilloso que tiene un motor con 100% de eficiencia, y que quema un combustible cuyo contenido de energía es 40 megajoules por litro. Si la resistencia del aire y las fuerzas totales de fricción sobre el vehículo, cuando viaja en carretera a rapidez constante, son 500 N, ¿cuál será la distancia máxima por litro que puede alcanzar el coche a esa rapidez?

Considera la ineficiencia que acompaña a la transformación de energía de esta manera: En cualquier transformación hay una dilución de la *energía útil* disponible. La cantidad de energía utilizable disminuye con cada transformación hasta que ya no queda nada, sino sólo la energía térmica a temperatura ordinaria. Cuando estudiemos termodinámica, veremos que la energía térmica es inútil para realizar trabajo, a menos que se transforme a una temperatura más baja. Una vez que llega a la temperatura práctica más baja, es decir, la del ambiente, no puede usarse. Nuestro entorno es el cementerio de la energía útil.

Comparación de la energía cinética y la cantidad de movimiento⁶



Comprender la distinción entre cantidad de movimiento y energía cinética es física de alto nivel.

¡EUREKA!

La energía cinética y la cantidad de movimiento son propiedades del movimiento. Pero son distintas. La cantidad de movimiento, como la velocidad, es una cantidad vectorial. Por otro lado, la energía es una cantidad escalar, como la masa. Cuando dos objetos se acercan, sus cantidades de movimiento se pueden anular en forma parcial o total. Su cantidad de movimiento total es menor que la cantidad de movimiento de cualquiera de ellos solos. Pero sus energías cinéticas no se

COMPRUEBA TU RESPUESTA

A partir de la definición $\text{trabajo} = \text{fuerza} \times \text{distancia}$, simplemente se obtiene $\text{distancia} = \text{trabajo}/\text{fuerza}$. Si todos los 40 millones de J de energía que hay en 1 L se usaran para efectuar el trabajo de vencer la resistencia del aire y las fuerzas de fricción, la distancia sería:

$$\text{Distancia} = \frac{\text{trabajo}}{\text{fuerza}} = \frac{40,000,000 \text{ J/L}}{500 \text{ N}} = 80,000 \text{ m/L} = 80 \text{ km/L}$$

(que aproximadamente es 190 mpg). Lo importante aquí es que aun con un motor hipotético perfecto, hay un límite superior del rendimiento de combustible, que es el que establece la conservación de la energía.

⁵ Cuando estudies termodinámica en el capítulo 18 aprenderás que un motor de combustión interna *debe* transformar algo de la energía de su combustible en energía térmica. Por otro lado, una celda de combustible, de las que podrían impulsar los vehículos del futuro, no tiene tal limitación. ¡Espera los automóviles del futuro, impulsados por celdas de combustible!

⁶ Esta sección puede saltarse en un curso breve de mecánica.



FIGURA 7.19

En comparación con la bala de metal y con la misma cantidad de movimiento, la bala de goma es más eficaz para voltear el bloque porque rebota al chocar. La bala de goma sufre mayor cambio de cantidad de movimiento y en consecuencia, imparte más impulso o "empujón" al bloque. ¿Cuál bala provoca mayores daños?

pueden anular. Como las energías cinéticas siempre son positivas (o cero), la energía cinética total de dos objetos en movimiento es mayor que la energía cinética de cualquiera de ellos.

Por ejemplo, las cantidades de movimiento de dos automóviles justo antes de un choque de frente se pueden sumar y resultar exactamente cero, y la chatarra combinada después del choque tendrá el mismo valor cero como su cantidad de movimiento. Pero las energías cinéticas se suman y, en este caso, la energía cinética queda después del choque, aunque está en distintas formas, principalmente como energía térmica. O también, las cantidades de movimiento de dos fuegos pirotécnicos que se acercan puede anularse, pero cuando explotan no hay forma de anular sus energías. La energía se presenta en muchas formas; la cantidad de movimiento sólo tiene una forma. La cantidad vectorial *cantidad de movimiento* es distinta de la cantidad escalar *energía cinética*.

Otra diferencia es cómo se relacionan ambas con la velocidad. Mientras que la cantidad de movimiento es proporcional a la velocidad (mv), la energía cinética es proporcional al cuadrado de la velocidad ($\frac{1}{2}mv^2$). Un objeto que se mueve con el doble de velocidad que otro, de la misma masa, tiene el doble de cantidad de movimiento; pero tiene cuatro veces más energía cinética. Puede proporcionar el doble de impulso a lo que encuentre en su camino, y es capaz de efectuar cuatro veces más trabajo.

Supón que acarreas el balón del fútbol americano y que estás a punto de chocar con un defensa, cuya cantidad de movimiento es igual y opuesta a la tuya. La cantidad de movimiento combinada, la tuya y la del oponente antes del impacto, es cero, y con seguridad ambos se detendrán en el impacto. El golpe ejercido en cada uno de ustedes es igual. Esto es válido cuando eres derribado por un tackleador pesado y lento, o por un corredor ligero y rápido. Si el producto de su masa

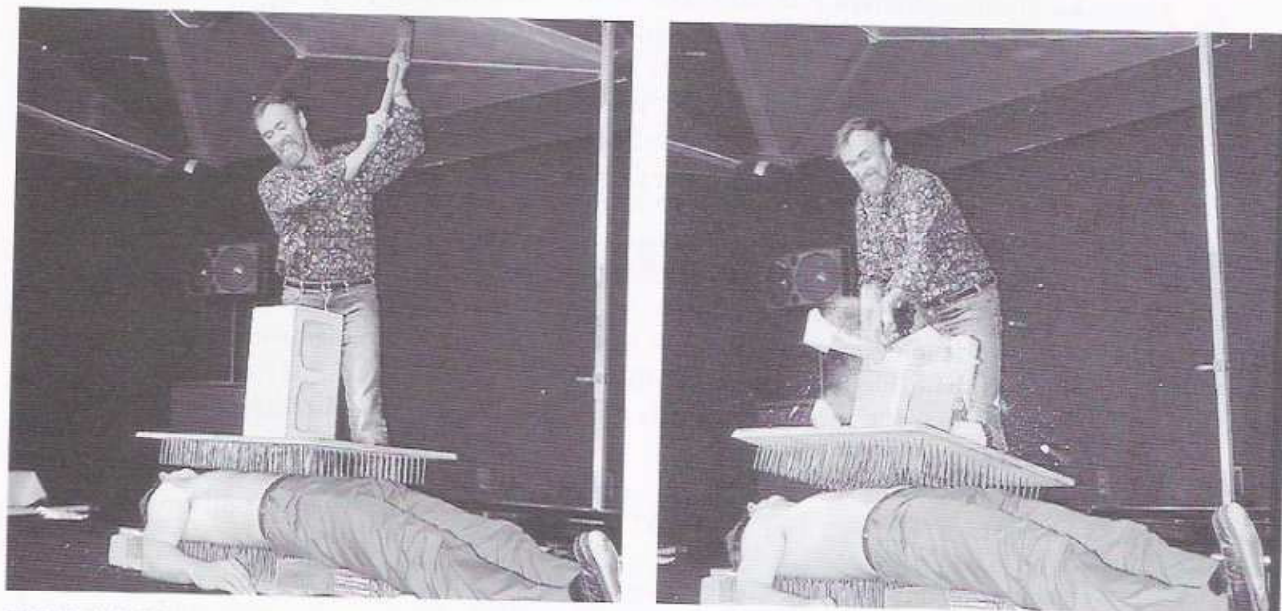


FIGURA 7.20

El autor imparte energía cinética y cantidad de movimiento al mazo, que pega con el bloque que descansa sobre su colega Paul Robinson, profesor de física, quien valientemente está como un emparedado entre camas de clavos. Paul no sufre lesiones. ¿Por qué? Aparte de que los fragmentos de concreto salen despedidos, la cantidad de movimiento íntegra del mazo es entregada a Paul en el impacto, y a continuación a la cama y al terreno que la soporta. Pero la cantidad de movimiento sólo proporciona el empujón; la energía es la que daña. La mayoría de la energía cinética nunca le llega porque se gasta en romper el bloque, y como energía térmica. La energía sobrante se distribuye en los más de 200 clavos que tocan a su cuerpo. La fuerza de impulsión por clavo no es suficiente para perforar la piel.

por su velocidad es igual que el tuyo, te detendrás en el lugar. El poder de parada es una cosa; pero ¿y los daños? Todo jugador sabe que duele más ser detenido por un corredor ligero y veloz que por un defensa pesado y lento. ¿Por qué? Porque un corredor ligero que se mueva con la misma cantidad de movimiento tiene más energía cinética. Si tiene la misma cantidad de movimiento que un jugador pesado, pero tiene la mitad de la masa, tiene el doble de velocidad. Con el doble de velocidad y la mitad de la masa, el jugador ligero tiene el doble de energía cinética que la del jugador pesado.⁷ Y efectúa el doble de trabajo contigo, tiende a magullarte en doble cantidad y, en general, te daña lo doble. ¡Cuídate de los jugadores pequeños que sean veloces!

Energía para la vida

Tú organismo es una máquina; una máquina extraordinariamente maravillosa. Está formada por máquinas más pequeñas, que son las células. Como cualquier máquina, las células vivas necesitan una fuente de energía. En el reino animal, al cual perteneces, las células se alimentan de diversos compuestos hidrocarbonados que liberan energía al reaccionar con el oxígeno. Al igual que la gasolina que se quema en un motor de automóvil, hay más energía potencial en las moléculas del alimento que en los productos de reacción después de haber metabolizado el alimento. La diferencia de energías es lo que sostiene la vida.

Vemos la ineficiencia en trabajo en la cadena alimenticia. Las criaturas mayores se alimentan de otras más pequeñas, las cuales, a la vez, comen criaturas más pequeñas, y así sucesivamente hasta llegar a las plantas y al plancton marino que se nutren con el Sol. Al subir cada escalón de la cadena alimenticia interviene más ineficiencia. En la planicie africana, 10 kilogramos de pastizal producen 1 kilogramo de gacela. Sin embargo, se necesitan 10 kilogramos de gacela para sostener a 1 kilogramo de león. Se ve que cada transformación de energía a lo largo de la cadena alimenticia contribuye a la ineficiencia general. Es interesante que algunas de las mayores criaturas del planeta, el elefante y la ballena azul, se alimentan mucho más abajo en la cadena alimenticia. Cada vez hay más seres humanos que están teniendo en cuenta organismos tan diminutos como el krill y las levaduras como fuentes nutritivas eficientes.



La energía es la forma en que la naturaleza lleva el marcador.

¡EUREKA!

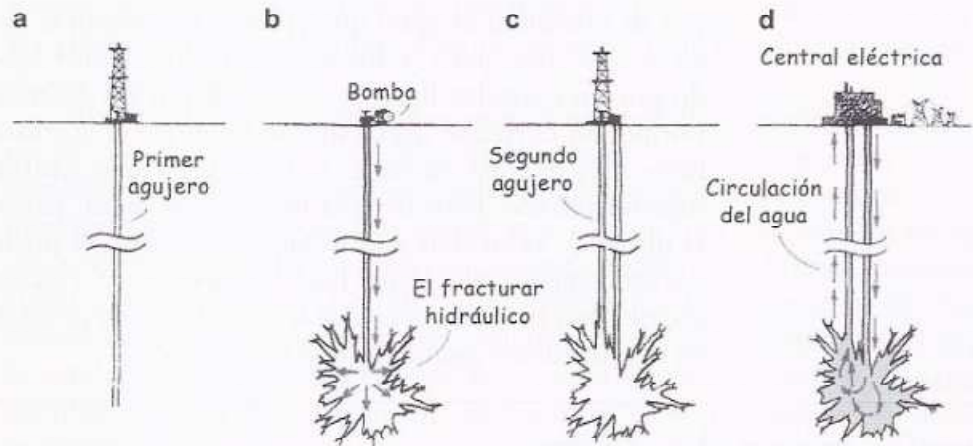
Fuentes de energía

A excepción de la energía nuclear y la geotérmica, la fuente de prácticamente toda nuestra energía es el Sol. La luz solar evapora agua, que después cae como lluvia, la lluvia corre por los ríos y hace girar las norias, o los modernos turbogeneradores hidráulicos, y luego regresa al mar. En una escala de tiempo mayor, la energía del Sol produce madera; y luego petróleo, carbón y gas natural. Estos materiales son el resultado de la fotosíntesis, un proceso biológico que incorpora la energía radiante del Sol al tejido de las plantas. En el mundo actual el abasto de energía de origen fósil se habrá agotado en un parpadeo (unos cuantos cientos de años) en comparación con el tiempo que requirió producirlo (millones de años). En tanto que el petróleo y el carbón fueron el principal combustible de las industrias del siglo xx, su importancia disminuirá durante el nuevo siglo. Veamos algunas fuentes alternativas de energía.

⁷ Ten en cuenta que $\frac{1}{2}(m/2)(2v)^2 = mv^2$, el doble del valor $\frac{1}{2}mv^2$ del jugador más pesado de masa m y rapidez v .

FIGURA 7.21

Energía geotérmica de estratos secos. a) Se perfora un agujero de varios kilómetros hasta llegar a granito seco. b) Se bombea agua en el agujero, a gran presión, que rompe la roca que la rodea y forma una cavidad con una mayor área en su superficie. c) Se perfora un segundo agujero que llegue a la cavidad. d) Se hace circular agua que baja por un agujero y pasa por la cavidad, donde se sobrecalienta antes de subir por el segundo agujero. Después de impulsar una turbina se vuelve a circular a la cavidad caliente, formando un ciclo cerrado.



La luz solar también se puede transformar en forma directa en electricidad mediante celdas fotovoltaicas, como en las calculadoras solares y, más recientemente, en celdas solares flexibles que se colocan en el techo de los edificios. La tecnología de la energía solar hace pensar en un futuro promisorio, ya que las celdas fotovoltaicas pueden generar grandes cantidades de energía para los países que tengan suficiente luz solar y área terrestre. Para cubrir sus necesidades de energía mediante celdas fotovoltaicas, un país como Estados Unidos requeriría un área tan grande como el estado de Massachussets. Sin embargo, no se espera que las fuentes fotovoltaicas por sí solas suministren la electricidad que necesitaremos en el futuro.

Hasta el viento, producido por calentamientos desiguales de la superficie terrestre, es una forma de energía solar. Se puede usar la energía del viento (energía eólica) para mover turbogeneradores en molinos de viento especiales. Como la energía eólica no se puede apagar y encender a voluntad, en la actualidad tan sólo complementa la producción de energía en gran escala proveniente de combustibles fósiles o nucleares. Controlar el viento es más práctico cuando la energía que produce se almacena para su uso en el futuro, como ocurre con el hidrógeno.

La forma más concentrada de energía útil está en el uranio, un combustible nuclear que podría ofrecer grandes cantidades de energía durante varias décadas. La tecnología de fisión avanzada que implica reactores de alimentación y el uso del torio podría extender esa línea del tiempo varios cientos de años (capítulo 34). Las plantas de energía nuclear no requieren de grandes extensiones de terreno y dependen del lugar sólo en la medida en que necesiten agua de enfriamiento. Las plantas actuales utilizan la fisión nuclear, pero es probable que la fusión nuclear predomine en el futuro. La fusión nuclear controlada aún es una fuente alternativa de energía fascinante de vasta magnitud. En la actualidad el temor público hacia todo lo que suene a nuclear evita el crecimiento de la energía nuclear. Es interesante destacar que el interior de la Tierra se mantiene caliente gracias a una forma de energía nuclear, que es el decaimiento o desintegración radiactivo, que nos ha acompañado desde el origen de los tiempos.

Un subproducto de la desintegración radiactiva en el interior de la Tierra es la energía geotérmica, calor que se puede encontrar debajo de la superficie de la tierra. La energía geotérmica se suele encontrar en zonas de actividad volcánica, como Islandia, Nueva Zelanda, Japón y Hawai, donde el agua calentada cerca de la superficie terrestre se controla para generar vapor y hacer funcionar turbogeneradores. En lugares donde el calor debido a la actividad volcánica está cerca de la superficie del terreno, y no hay agua freática, otro método prometedor para obtener electricidad en forma económica y amigable al ambiente es la energía geotérmica en terreno seco, donde se forman cavidades en rocas profundas y secas, y se introduce agua a las cavidades. Cuando el agua se transforma en vapor, se conduce a una turbina en la superficie. Después se regresa como agua a la cavidad, para volver a usarse.



Tarde o temprano, toda la luz solar que llegue a la Tierra será irradiada de regreso al espacio. La energía en cualquier ecosistema siempre está de paso: Podemos rentarla, aunque no poseerla.

¡EUREKA!



Inventores, ¡presten atención!: Cuando presenten una nueva idea, primero asegúrense de que está en el contexto de lo que se conoce en ese momento. Por ejemplo, debe ser congruente con la conservación de la energía.

¡EUREKA!

La energía geotérmica, como la solar, la eólica y la hidráulica, es amigable con el ambiente. Otros métodos de obtención de energía tienen consecuencias graves para el ambiente. Aunque la energía nuclear no contamina la atmósfera, es muy problemática por los desechos nucleares que genera. Por otra parte, la combustión de materiales fósiles causa mayores concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, dióxido de azufre y otros contaminantes, así como exceso de calentamiento en la atmósfera.

Los vehículos impulsados por hidrógeno están captando la atención en la actualidad, como parte de una potencial economía del futuro basada en el hidrógeno. Debe destacarse que el hidrógeno *no* es una fuente de energía. Al igual que la electricidad, el hidrógeno es un portador o almacén de energía que requiere una fuente de energía. Sólo parte del trabajo requerido para separar el hidrógeno del agua o de los hidrocarburos es la energía disponible para utilizarse. De nuevo, hay que resaltar, el hidrógeno *no* es una fuente de energía.

A medida que aumenta la población mundial, también se incrementan nuestras necesidades de energía, sobre todo considerando que también está aumentando la demanda per cápita. Con las reglas de la física que los guían, los tecnólogos están investigando en la actualidad formas nuevas y más limpias de desarrollar fuentes de energía. Sin embargo, compiten en una carrera para ir delante del crecimiento poblacional y la mayor demanda en el mundo altamente desarrollado. Por desgracia, así como el control de la población es política y religiosamente incorrecto, la miseria humana se convierte en indicio de la explosión demográfica incontrolable. Gorge Orwell escribió una vez (en *The Outline of History*), “la historia de la humanidad se vuelve cada vez más una carrera entre la educación y el desastre”.

Resumen de términos

Conservación de la energía La energía no se puede crear ni destruir; se puede transformar de una de sus formas a otra, pero la cantidad total de energía nunca cambia.

Conservación de la energía en las máquinas El trabajo que sale de cualquier máquina no puede ser mayor al trabajo que entra. En una máquina ideal, donde no se transforme energía en energía térmica, $\text{trabajo}_{\text{entrada}} = \text{trabajo}_{\text{salida}}$ y $(Fd)_{\text{entrada}} = (Fd)_{\text{salida}}$.

Eficiencia (o rendimiento) El porcentaje del trabajo que entra a una máquina, que se convierte en trabajo útil que sale. (Con más generalidad, la energía útil que sale dividida entre la energía total que entra.)

Energía Propiedad de un sistema que le permite efectuar trabajo.

Energía cinética Energía de movimiento, cuantificada por la ecuación

$$\text{Energía cinética} = \frac{1}{2} mv^2$$

Energía potencial Energía que posee un cuerpo debido a su posición.

Máquina Dispositivo como una palanca o polea, que aumenta o disminuye una fuerza, o que tan sólo cambia la dirección de ésta.

Palanca Máquina simple que consiste en una varilla rígida que gira sobre un punto fijo llamado fulcro.

Potencia Rapidez con que se efectúa trabajo:

$$\text{Potencia} = \frac{\text{trabajo}}{\text{tiempo}}$$

(Con más generalidad, la rapidez a la que se expande la energía.)

Teorema del trabajo y la energía El trabajo efectuado sobre un objeto es igual al cambio de energía cinética en el objeto.

$$\text{Trabajo} = \Delta E_C$$

Trabajo Producto de la fuerza por la distancia a lo largo de la cual la fuerza obra sobre un cuerpo:

$$T = Fd$$

(Con más generalidad, es el componente de la fuerza en la dirección del movimiento por la distancia recorrida.)

Lectura sugerida

Bodanis, David. *E = mc²: A Biography of the World's Most Famous Equation*. Nueva York: Berkley Publishing Group, 2002. Una encantadora y motivadora historia sobre nuestra comprensión de la energía.

Preguntas de repaso

1. ¿Cuándo es más evidente la energía?

Trabajo

2. Una fuerza cambia el movimiento a un objeto. Cuando se multiplica la fuerza por el tiempo durante el que se aplica, a esa cantidad se le llama *impulso*, el cual cambia la *cantidad de movimiento* de ese objeto. ¿Cuál es el nombre de la cantidad $\text{fuerza} \times \text{distancia}$?
3. Describe un ejemplo en el que una fuerza se ejerza sobre un objeto sin hacer trabajo sobre ese objeto.
4. ¿Qué requiere más trabajo: subir un saco de 50 kg una distancia vertical de 2 m, o subir un saco de 25 kg una distancia vertical de 4 m?

Potencia

5. Si en el problema anterior los dos sacos suben sus respectivas distancias en el mismo tiempo, ¿cómo se compara la potencia requerida en cada caso? ¿Y en el caso en el que el saco más ligero suba su distancia en la mitad del tiempo?

Energía mecánica

6. ¿Qué es exactamente lo que permite a un objeto efectuar trabajo?

Energía potencial

7. Un automóvil es levantado a cierta distancia en una rampa de la estación de servicio y entonces tiene una energía potencial relativa al piso. Si se levantara el doble de la distancia, ¿cuánta energía potencial tendría?
8. Dos automóviles son levantados a la misma altura en las rampas de la estación de servicio. Si uno de ellos tiene el doble de masa que el otro, ¿cómo se comparan sus energías potenciales?
9. ¿Cuándo la energía potencial de algo es importante?

Energía cinética

10. Un automóvil en movimiento tiene cierta energía cinética. Si su rapidez aumenta cuatro veces mayor. ¿Cuánta energía cinética tiene ahora, en comparación con la anterior?

Teorema del trabajo y la energía

11. En comparación con alguna rapidez inicial, ¿cuánto trabajo deben efectuar los frenos de un automóvil para detenerlo si va cuatro veces más rápido? ¿Cómo se comparan las distancias de frenado?
12. Si empujas horizontalmente una caja con 100 N, atravesando 10 m del piso de una fábrica, y la fuerza de fricción entre la caja y el piso es de 70 N constante, ¿cuánta EC gana la caja?
13. ¿Cómo afecta la rapidez a la fricción entre el pavimento y un neumático que se patina?

Conservación de la energía

14. ¿Cuál será la energía cinética del pilón de un martinete cuando baja 10 kJ su energía potencial?
15. Una manzana que cuelga de una rama tiene energía potencial, debida a su altura. Si cae, ¿qué le sucede a esta energía justo antes de llegar al suelo? ¿Y cuando llega al suelo?
16. ¿Cuál es la fuente de la energía de los rayos solares?

Máquinas

17. ¿Una máquina puede multiplicar la fuerza que se le suministra? ¿La distancia en su entrada? ¿Y la energía de entrada? (Si tus tres respuestas son iguales, busca ayuda, ya que la última pregunta es especialmente importante.)
18. Si una máquina multiplica una fuerza por cuatro, ¿qué otra cantidad disminuye y cuánto?
19. Se aplica una fuerza de 50 N al extremo de una palanca, y ésta se mueve cierta distancia. Si el otro extremo de la palanca mueve la tercera parte, ¿cuánta fuerza puede ejercer?

Eficiencia

20. ¿Cuál es la eficiencia de una máquina que milagrosamente convierte en energía útil toda la energía que se le suministra?
21. Acerca de la pregunta anterior, si la carga levantada es de 500 N, ¿cuál será la eficiencia del sistema de poleas?
22. ¿Qué le sucede al porcentaje de energía útil cuando se pasa de una forma de energía a otra?

Comparación de la energía cinética y la cantidad de movimiento

23. ¿Qué quiere decir que la cantidad de movimiento es una cantidad vectorial y que la energía es una cantidad escalar?
24. ¿Pueden anularse las cantidades de movimiento? ¿Pueden anularse las energías?
25. Si un objeto en movimiento aumenta su rapidez al doble, ¿cuánta cantidad de movimiento más tiene? ¿Cuánta energía más tiene?
26. Si un objeto en movimiento aumenta su rapidez al doble, ¿cuánto impulso más imparte al objeto con que choca (cuánto empujón más)? ¿Cuánto trabajo más efectúa al ser detenido (cuánto daño más)?

Energía para la vida

27. ¿En qué sentido nuestros cuerpos son máquinas?

Fuentes de energía

28. ¿Cuál es la fuente primordial de las energías obtenidas al quemar combustibles fósiles, en las presas o en los molinos de viento?
29. ¿Cuál es la fuente primordial de la energía geotérmica?
30. ¿Es correcto decir que el hidrógeno es una nueva fuente de energía? ¿Por qué?

Cálculos de un paso

Trabajo = fuerza × distancia: $T = Fd$

1. Calcula el trabajo realizado cuando una fuerza de 1 N mueve un libro 2 metros.
2. Calcula el trabajo realizado cuando una fuerza de 20 N empuja un carrito 3.5 m.
3. Calcula el trabajo realizado al levantar una barra de pesas de 500 N, 2.2 metros por encima del piso. (¿Cuál es la energía potencial de la barra de pesas cuando es levantada a esta altura?)

Potencia = trabajo/tiempo: $P = T/t$

4. Calcula los watts de potencia que se gastan cuando una fuerza de 1 N mueve un libro 2 m en un intervalo de tiempo de 1 s.
5. Calcula la potencia que se gasta cuando una fuerza de 20 N empuja un carrito 3.5 m en un tiempo de 0.5 s.
6. Calcula la potencia que se gasta cuando una barra de pesas de 500 N es levantada 2.2 m en 2 s.

Energía potencial gravitacional = peso × altura:

$$EP = mgh$$

7. ¿Cuántos joules de energía potencial gana un libro de 1 kg cuando es elevado a una altura de 4 m? ¿Y cuando se le eleva 8 m?
8. Calcula el incremento en energía potencial cuando un bloque de hielo de 20 kg es levantado una distancia vertical de 2 m.
9. Calcula el cambio en energía potencial de 8 millones de kg de agua que caen 50 m en las Cataratas del Niágara.

Energía cinética = $1/2$ masa × rapidez²: $EC = 1/2 mv^2$

10. Calcula el número de joules de energía cinética que tiene un libro de 1 kg cuando es lanzado a través de un cuarto con una rapidez de 2 m/s.
11. Calcula la energía cinética de un carrito de juguete de 3 kg que se mueve a 4 m/s.
12. Calcula la energía cinética del mismo carrito que se mueve con el doble de rapidez.

Teorema del trabajo y la energía: Trabajo = ΔEC

13. ¿Cuánto trabajo se requiere para aumentar la energía cinética de una automóvil en 5,000 J?
14. ¿Qué cambio en la energía cinética experimenta un avión en el despegue, si en una distancia de 500 m se aplica una fuerza neta continua de 5,000 N?

3. ¿Cuánto trabajo realizas sobre una mochila de 25 kg cuando caminas una distancia horizontal de 100 m?
4. Si tu amigo empuja una podadora de césped cuatro veces más lejos que tú mientras ejerce sólo la mitad de la fuerza, ¿quién de ustedes realiza más trabajo? ¿Cuánto más?
5. ¿Por qué uno se cansa cuando empuja sobre una pared que permanece inmóvil cuando en realidad no se realiza ningún trabajo sobre ésta?
6. ¿Qué requiere más trabajo: estirar un resorte fuerte una cierta distancia o estirar un resorte débil la misma distancia? Sustenta tu respuesta.
7. Dos personas que pesan lo mismo suben un tramo de las escaleras. La primera persona sube en 30 s, mientras que la segunda sube en 40 s. ¿Cuál de las dos realiza más trabajo? ¿Cuál utiliza más potencia?
8. ¿Se requiere más trabajo para llevar un camión cargado por completo a una determinada rapidez, que llevar ese mismo camión pero con una carga ligera a esa rapidez? Sustenta tu respuesta.
9. Para determinar la energía potencial del arco tensado de Tenny (figura 7.7), si se multiplica la fuerza con la que sostiene el arco en su posición tensada por la distancia que se abrió la cuerda, ¿el resultado sería menor o mayor que la energía potencial real? ¿Por qué se dice que el trabajo efectuado es igual a la fuerza promedio × distancia?
10. Un carrito gana energía conforme desciende por una colina. ¿Cuál es la fuerza que hace el trabajo? (No sólo respondas que la gravedad.)
11. Cuando se dispara un rifle con cañón largo, la fuerza de los gases en expansión actúa sobre la bala durante mayor distancia. ¿Qué efecto tiene lo anterior sobre la velocidad con la que sale la bala? (¿Ves por qué la artillería de gran alcance tiene cañones largos?)
12. Tu amigo afirma que la energía cinética de un objeto depende del marco de referencia del observador. ¿Estás de acuerdo con él? ¿Por qué?
13. Tú y un sobrecargo se lanzan entre sí una pelota dentro de un avión en vuelo. ¿La EC de la pelota depende de la rapidez del avión? Explícalo con cuidado.
14. Ves a tu amigo despegar en un avión a chorro, y comentas sobre la energía cinética que ha adquirido. Pero tu amigo dice que no ha aumentado su energía cinética. ¿Quién está en lo correcto?
15. Cuando aterriza un jumbo jet hay un decremento tanto en su energía cinética como en su potencial. ¿A dónde se va dicha energía?
16. Una pelota de béisbol y otra de golf tienen la misma cantidad de movimiento. ¿Cuál de ellas tienen la mayor energía cinética?
17. Puedes elegir entre atrapar una pelota de béisbol o una de bolos, ambas con la misma EC. ¿Cuál es más segura?
18. Explica por qué el deporte salto con pértiga cambió drásticamente cuando las garrochas flexibles de fibra de vidrio reemplazaron las anteriores garrochas de madera rígida?

Ejercicios

1. ¿Qué es más fácil detener: un camión ligero o uno pesado, si los dos tienen la misma rapidez?
2. ¿Qué requiere más trabajo para detenerse: un camión ligero o uno pesado que tenga la misma cantidad de movimiento?

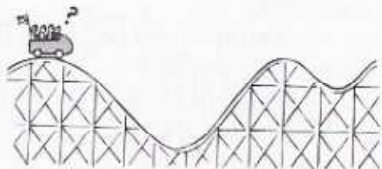
19. ¿En qué punto de su movimiento es máxima la EC de la lenteja de un péndulo? ¿En qué punto su EP es máxima?

Cuando la EC tiene la mitad de su valor máximo, ¿cuánta EP posee?

20. Un profesor de física demuestra la conservación de la energía soltando un péndulo con lenteja pesada, como se ve en la figura, y deja que oscile. ¿Qué podría suceder si en su entusiasmo le diera a la lenteja un empujoncito con su nariz al soltarla? Explica por qué.

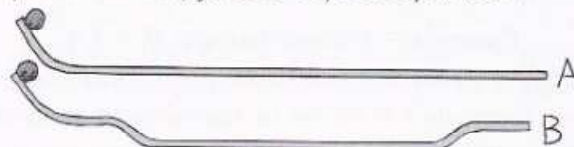


21. ¿La Estación Espacial Internacional tiene energía potencial gravitacional? ¿Y energía cinética? Explica tus respuestas.
22. ¿Qué dice el teorema del trabajo y la energía acerca de la rapidez de un satélite que está en órbita circular?
23. Un martillo en movimiento golpea un clavo y lo sume en la pared. Si el martillo golpea el clavo con el doble de rapidez, ¿cuánto más profundamente se hundirá el clavo? ¿Y si lo golpea con el triple de rapidez?
24. ¿Por qué la fuerza de gravedad no hace trabajo sobre a) una bola de bolos que rueda por la pista y b) un satélite en órbita circular en torno a la Tierra?
25. ¿Por qué la fuerza de gravedad sí hace trabajo sobre un automóvil que baja por una cuesta, pero no efectúa trabajo cuando el automóvil va por una carretera plana?
26. ¿La cuerda que sostiene la lenteja de un péndulo hace trabajo sobre ésta al oscilar? ¿La fuerza de gravedad efectúa trabajo sobre la lenteja?
27. Se tira de una caja por un piso horizontal con una cuerda. Al mismo tiempo, la caja tira hacia atrás de la cuerda, de acuerdo con la tercera ley de Newton. ¿Se iguala a cero el trabajo efectuado por la cuerda sobre la caja? Explica por qué.
28. En una resbaladilla, un niño tiene energía potencial que disminuye 1,000 J mientras que su energía cinética aumenta 900 J. ¿Qué otra forma de energía interviene y cuánta es?
29. Alguien te quiere vender una "superpelota" y te dice que rebota a mayor altura que aquella desde la que la dejaron caer. ¿Puede suceder esto?
30. ¿Por qué una superpelota que se deja caer desde el reposo no puede regresar a su altura original cuando rebota sobre un piso rígido?
31. Considera una pelota que se lanza al aire directo hacia arriba. ¿En qué posición es máxima su energía cinética? ¿Dónde es máxima su energía potencial gravitacional?
32. Describe el diseño de la montaña rusa de la siguiente figura, en términos de conservación de la energía.

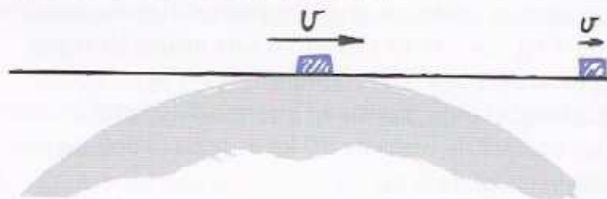


33. Supón que tú y dos de tus compañeros discuten sobre el diseño de una montaña rusa. Uno dice que cada cumbre debe ser mas baja que la anterior. El otro dice que eso es una tontería, porque mientras que la primera sea la más alta, no importa qué altura tengan las demás. ¿Qué dices tú?

34. Considera dos esferas idénticas que se sueltan desde el reposo en las pistas A y B, como se muestra en la siguiente figura. Cuando llegan a los extremos opuestos de las pistas, ¿cuál tendrá la mayor rapidez? ¿Por qué esta pregunta es más fácil de contestar que su similar (ejercicio 40) del capítulo 3?



35. Supón que un objeto se pone a deslizar con una rapidez menor que la velocidad de escape, sobre un plano infinito y sin fricción, en contacto con la superficie terrestre, como muestra la siguiente figura. Describe su movimiento. ¿Seguirá deslizándose eternamente con velocidad constante? ¿Se llegará a detener? ¿En qué aspecto sus cambios de energía se parecerán a los de un péndulo?

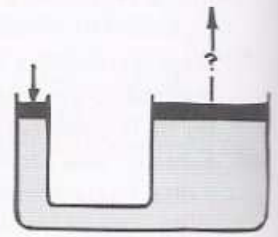


36. Si se mueven con la misma energía cinética una pelota de golf y una de ping-pong (tenis de mesa), ¿puedes decir cuál tiene mayor rapidez? Explicalo en función de la definición de EC. Asimismo, en una mezcla gaseosa de moléculas masivas y ligeras, con la misma EC promedio, ¿puedes decir cuáles tienen la mayor rapidez?
37. ¿Un automóvil quema más gasolina cuando enciende sus luces? ¿Su consumo total de gasolina depende de si el motor trabaja mientras las luces están encendidas? Sustenta tu respuesta.
38. Al encender el aire acondicionado en un automóvil suele aumentar el consumo de combustible. Sin embargo, a ciertas rapideces un automóvil con las ventanillas abiertas y con el aire acondicionado apagado puede consumir más combustible. Explica por qué.
39. Cuando la chica de la figura 7.14 sube el automóvil con el gato, ¿cómo una fuerza tan pequeña puede aplicarse para producir suficiente trabajo para levantar el automóvil?
40. ¿Para qué tomarse la molestia de utilizar una máquina si ésta no puede multiplicar el trabajo de entrada para alcanzar un mayor trabajo de salida?
41. Dices a un amigo que ninguna máquina puede generar más energía que la que se introdujo en ella, y tu amigo te contesta que un reactor nuclear produce más energía que la que consume. ¿Qué le dirías entonces a tu amigo?

42. ¿Qué ecuación famosa describe la relación que hay entre la masa y la energía?
43. Esta pregunta parecerá fácil de contestar: ¿Con qué fuerza llega al suelo una piedra que pesa 10 N, si se deja caer desde el reposo a 10 m de altura? De hecho, la pregunta no se puede contestar a menos que se conozca más. ¿Por qué?
44. Tu amigo confunde las ideas que explicamos en el capítulo 4, que parecen contradecir los conceptos que estudiamos en este capítulo. Por ejemplo, en el capítulo 4 vimos que la fuerza neta es cero, para un automóvil que viaja por una carretera horizontal a velocidad constante, y en este capítulo aprendimos que en tal caso se efectúa trabajo. Tu amigo pregunta "¿cómo se puede efectuar trabajo si la fuerza neta es igual a cero?" Da tu explicación.
45. Cuando no hay resistencia del aire, una pelota que se lanza verticalmente hacia arriba con determinada EC inicial regresará a su nivel original con la misma EC. Cuando la resistencia del aire afecta la pelota, ¿regresará ésta a su nivel original con la misma EC, o con más o con menos? ¿Tu respuesta contradice la ley de la conservación de la energía?
46. Estás en una azotea y lanzas una pelota hacia abajo y otra hacia arriba. La segunda pelota, después de subir, cae y también llega al piso. Si no se tiene en cuenta la resistencia del aire, y las rapidezces iniciales hacia arriba y hacia abajo son iguales, ¿cómo se compararán las rapidezces de las pelotas al llegar al suelo? (Usa el concepto de la conservación de la energía para llegar a tu respuesta.)
47. Al ir cuesta arriba, el motor de gasolina en un automóvil híbrido que consume gasolina y energía eléctrica provee 75 caballos de fuerza, mientras que la potencia total que propulsa el vehículo es de 90 caballos de fuerza. Quemar gasolina suministra los 75 caballos de fuerza. ¿Qué suministra los otros 15 caballos de fuerza?
48. Cuando un conductor aplica los frenos para mantener el vehículo cuesta abajo con una rapidez constante y con una energía cinética constante, la energía potencial del automóvil disminuye. ¿A dónde se va esta energía? ¿A dónde se va la mayor parte de ella con un vehículo híbrido?
49. ¿La EC de un automóvil cambia más cuando pasa de 10 a 20 km/h, o cuando pasa de 20 a 30 km/h?
50. ¿Es posible que algo tenga energía sin tener cantidad de movimiento? Explica tu respuesta. ¿Es posible que algo tenga cantidad de movimiento sin tener energía? Sustenta tu respuesta.
51. Cuando la masa de un objeto en movimiento se duplica sin cambio en la rapidez, ¿por qué factor cambia su cantidad de movimiento? ¿Por qué factor cambia su energía cinética?
52. Cuando la velocidad de un objeto se duplica, ¿por qué factor cambia su cantidad de movimiento? ¿Por qué factor cambia su energía cinética?
53. ¿Qué tiene la mayor cantidad de movimiento, si es el caso: una pelota de 1 kg que se mueve a 2 m/s o una pelota de 2 kg que se mueve a 1 m/s? ¿Cuál tiene la mayor energía cinética?
54. Un automóvil tiene la misma energía cinética cuando viaja hacia el norte que cuando da la media vuelta y viaja hacia el sur. ¿La cantidad de movimiento del automóvil es la misma en ambos casos?
55. Si la EC de un objeto es cero, ¿cuál será su cantidad de movimiento?
56. Si tu cantidad de movimiento es cero, ¿tu energía cinética necesariamente será cero también?
57. Si dos objetos tienen igual energía cinética, ¿necesariamente tienen la misma cantidad de movimiento? Sustenta tu respuesta.
58. Dos terrones de arcilla con cantidades de movimiento iguales y opuestas chocan de frente y quedan en reposo. ¿Se conserva su cantidad de movimiento? ¿Se conserva su energía cinética? ¿Por qué tus respuestas son iguales o distintas?
59. Puedes optar entre dos choques de frente contra chicos que van sobre una patineta. Una es con uno ligero que se mueve con bastante rapidez, y la otra es con uno que pesa el doble y que se mueve con la mitad de rapidez. Si sólo se tienen en cuenta la masa y la rapidez, ¿qué choque preferirías?
60. Las tijeras para cortar papel tienen cuchillas grandes y mangos cortos, mientras que las tijeras para cortar metal tienen mangos largos y cuchillas cortas. Las tijeras para cortar pernos tienen manijas muy largas y cuchillas muy cortas. ¿Por qué son así?
61. Describe lo que sucedería al profesor de física que se encuentra entre las camas de clavos (figura 7.20), si el bloque fuera menos masivo e irrompible y las camas tuvieran menos clavos.
62. En el siguiente aparato de bolas oscilantes, si dos bolas se levantan y se dejan caer, la cantidad de movimiento se conserva en las bolas que salen del otro lado y la misma rapidez que tenían al chocar las que se dejaron caer. Pero también se conservaría la cantidad de movimiento si una bola saltara con el doble de la rapidez. ¿Puedes explicar por qué nunca sucede así? (¿Y por qué este ejercicio está en el capítulo 7 y no en el capítulo 6?)



63. Se dice que una máquina ineficiente “desperdicia energía”. Ello significa que en realidad se pierde la energía. ¿Por qué?
64. Si un automóvil tuviera un motor con 100% de eficiencia en transformar toda la energía del combustible en trabajo, ¿se calentaría dicho motor? ¿Arrojaría calor por el escape? ¿Haría ruido? ¿Vibraría? ¿Algo de su combustible no se usaría?
65. Para combatir los hábitos de desperdicio, con frecuencia se habla de “conservar la energía” apagando las luces y el calentador de agua cuando no se utilizan, así como manteniendo los termostatos en un valor moderado. En este capítulo también hablamos de la “conservación de la energía”. Describe la diferencia entre estas dos acepciones.
66. Cuando una empresa eléctrica no puede satisfacer la demanda de electricidad por parte de sus clientes, por ejemplo en algún día caluroso de verano, ¿el problema sería por “crisis de energía” o por “crisis de potencia”? Explica por qué.
67. Tu amigo te dice que una forma de mejorar la calidad del aire en una ciudad sería tener las luces de los semáforos sincronizadas, de manera que los automovilistas pudieran recorrer grandes distancias a rapidez constante. ¿Qué principio de la física sustenta este razonamiento?
68. La energía que necesitamos para vivir proviene de la energía potencial química almacenada en el alimento, que se convierte en otras formas de energía durante el proceso del metabolismo. ¿Qué sucede a una persona cuya producción combinada de trabajo y calor es menor que la energía que consume? ¿Qué sucede cuando el trabajo y el calor producido por la persona es mayor que la energía que consume? ¿Una persona desnutrida puede efectuar trabajo adicional sin alimento adicional? Sustenta tus respuestas.
69. Una vez utilizada, ¿la energía puede regenerarse? ¿Tu respuesta es consistente con el término común de “energía renovable”?
70. ¿Qué relación tienen la paz, la cooperación y la seguridad internacionales con las necesidades energéticas del mundo?
3. ¿Qué produce el mayor cambio de energía cinética: ejercer una fuerza de 10 N durante una distancia de 5 m o ejercer una fuerza de 20 N durante una distancia de 2 m? (Supón que todo el trabajo se transforma en EC.)
4. Esta pregunta es característica de algunos exámenes de manejo: Un automóvil que va a 50 km/h se derrapa 15 m con los frenos bloqueados. ¿Cuánto se derraparía con los frenos bloqueados a 150 km/h?
5. Se utiliza una palanca para subir una carga pesada. Cuando una fuerza de 50 N empuja uno de los extremos de la palanca 1.2 m hacia abajo, la carga sube 0.2 m. Calcula el peso de la carga.
6. Al subir un piano de 5,000 N con un sistema de poleas, los trabajadores notan que, por cada 2 m de cuerda que jalen hacia abajo, el piano sube 0.2 m. De manera ideal, ¿cuánta fuerza se requeriría para subir el piano?
7. En la máquina hidráulica de la figura se ve que cuando el pistón pequeño baja 10 cm, el pistón grande sube 1 cm. Si el pistón pequeño se oprime con una fuerza de 100 N, ¿cuál será la máxima fuerza que el pistón grande puede ejercer?
8. Una paracaidista de 60 kg se mueve con rapidez terminal y cae 50 m en 1 s. ¿Qué potencia disipa en el aire?
9. En el caso del choque inelástico entre los dos furgones que se planteó en el capítulo anterior (figura 6.14), la cantidad de movimiento antes y después del choque es igual. Sin embargo, la EC es menor después del choque que antes. ¿Cuánto menos y qué sucede con esta energía?
10. Con las definiciones de cantidad de movimiento y energía cinética, $p = mv$ y $EC = (\frac{1}{2})mv^2$ demuestra, con operaciones algebraicas, que se puede escribir $EC = p^2/2m$. Esta ecuación indica que si dos objetos tienen la misma cantidad de movimiento, el de menor masa tendrá mayor energía cinética (véase el ejercicio 2).
11. ¿Cuántos kilómetros por litro rendirá un automóvil si su motor tiene 25% de eficiencia y avanza, en carretera con rapidez constante, contra una fuerza promedio de resistencia de 500 N? Supón que el contenido de energía de la gasolina es 40 MJ/litro.
12. La energía que obtenemos del metabolismo puede efectuar trabajo y generar calor. a) ¿Cuál es la eficiencia mecánica de una persona relativamente inactiva que gasta 100 W de potencia para producir aproximadamente 1 W de potencia en forma de trabajo, mientras genera más o menos 99 W de calor? b) ¿Cuál es la eficiencia mecánica de un ciclista que, en una ráfaga de esfuerzo produce 100 W de potencia mecánica con 1,000 W de potencia metabólica?



Problemas

1. El segundo piso de una casa está 6 m por arriba del nivel de la calle. ¿Cuánto trabajo se requiere para subir un refrigerador de 300 kg al nivel del segundo piso?
2. Bernie el Panzazos se lanza un clavado desde lo alto de un asta, hacia una alberca que se encuentra debajo. Cuando está en lo alto su energía potencial es de 10,000 J. ¿Cuál será su energía cinética cuando su energía potencial se reduzca a 1,000 J?

Movimiento rotatorio



Rapidez rotatoria

i Un caballito cerca del exterior de un carrusel se mueve con mayor rapidez que uno que está en el interior? O bien, ¿tienen los dos la misma rapidez? Pregúntaselo a varios amigos y obtendrás respuestas distintas. Ello se debe a que es fácil confundir la rapidez lineal con la rapidez rotatoria.

Mary Beth Monroe sostiene un “demostrador de momento de torsión” antes de pasarlo alrededor de sus alumnos para que lo prueben.

Movimiento circular



Cuando un objeto gira en torno a un eje interno, el movimiento es una *rotación* o un giro. Un carrusel o una tornamesa giran alrededor de un eje central interno. Cuando un objeto gira en torno a un eje externo, el movimiento se denomina una *revolución*. La Tierra completa una revolución alrededor del Sol cada año, mientras que gira en torno a su eje polar una vez al día.

¡EUREKA!

La **rapidez lineal** es algo a lo que simplemente llamamos *rapidez* en los capítulos anteriores, es decir, la distancia recorrida por unidad de tiempo. Un punto del exterior de un carrusel o de una tornamesa recorre mayor distancia en una vuelta completa que un punto más cercano al centro. El hecho de recorrer una mayor distancia en el mismo tiempo equivale a tener mayor rapidez. La rapidez lineal es mayor en el exterior de un objeto giratorio que en su interior: más cerca del eje. La rapidez de algo que se mueva describiendo una trayectoria circular se denomina **rapidez tangencial**, porque la dirección del movimiento es tangente a la circunferencia del círculo. Para el movimiento circular se usan en forma indistinta los términos rapidez lineal y rapidez tangencial.

La **rapidez rotatoria**, **rapidez rotacional** o **rapidez de rotación** (que algunas veces se llama *rapidez angular*) indica el número de rotaciones o revoluciones por unidad de tiempo. Todas las partes del carrusel rígido y de la tornamesa giran en torno al eje de rotación en la misma cantidad de tiempo. Todas las partes tienen la misma tasa de rotación, o el mismo *número de rotaciones o revoluciones por unidad de tiempo*. Se acostumbra expresar las tasas rotacionales en revoluciones por minuto (RPM).¹ Hace algunos años, por ejemplo, se usaban discos fonográficos que giraban a $33\frac{1}{3}$ RPM. Un insecto que se posara en cualquier parte de la superficie del disco giraría a $33\frac{1}{3}$ RPM.

La rapidez tangencial y la rapidez de rotación se relacionan. ¿Alguna vez te has subido a una de las plataformas giratorias gigantes de un parque de diversiones? Cuanto más rápido gira, tu rapidez tangencial será mayor. Eso tiene sentido; cuanto más RPM haya, será mayor tu velocidad en metros por segundo. Se dice que la rapidez tangencial es *directamente proporcional* a la rapidez de rotación a cualquier distancia fija, a partir del eje de rotación.

¹ En física se acostumbra describir la rapidez de rotación, ω , como número de “radianes” que gira un objeto en la unidad de tiempo. En una vuelta completa hay poco más de 6 radianes (2π radianes, para ser exactos). Cuando se asigna una dirección a la rapidez de rotación, la llamamos *velocidad de rotación* (a menudo llamada *velocidad angular*): La velocidad de rotación es un vector cuya magnitud es la rapidez de rotación. Por convención, el vector de velocidad de rotación se encuentra a lo largo del eje de rotación.

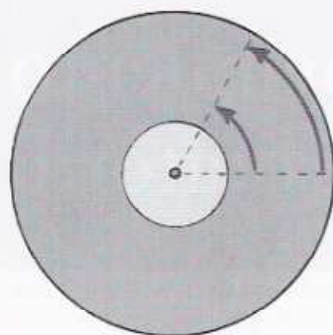


FIGURA 8.1

Figura interactiva

Cuando gira un disco de fonógrafo, el insecto llamado catarina que está más alejada del centro recorre una trayectoria más larga en el mismo tiempo, por lo que tiene mayor rapidez tangencial.

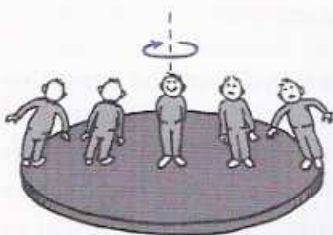


FIGURA 8.3

Figura interactiva

La rapidez tangencial de cada individuo es proporcional a la rapidez rotacional de la plataforma, multiplicada por la distancia al eje.



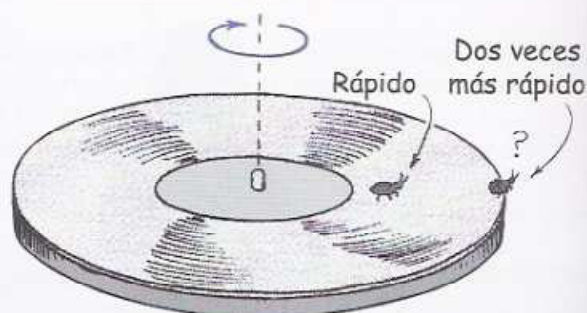
Cuando una fila de personas, tomadas de los brazos en una pista de patinaje, dan una vuelta, el movimiento de "el último en la fila" es evidencia de una mayor rapidez tangencial.

¡EUREKA!

FIGURA 8.2

Figura interactiva

Todo el disco gira con la misma rapidez rotacional, pero las catarinas que están a distintas distancias del centro se mueven con diferentes rapidez tangenciales. Un insecto que esté al doble de distancia del centro se moverá con el doble de rapidez.



La rapidez tangencial, a diferencia de la rapidez de rotación, depende de la distancia radial (distancia al eje). En el mero centro de la plataforma giratoria no tienes rapidez, tan sólo giras. Pero a medida que te acercas a la orilla de la plataforma, sientes que te mueves cada vez con mayor rapidez. La rapidez tangencial es directamente proporcional a la distancia al eje, para determinada rapidez de rotación.

De manera que vemos que la rapidez tangencial es directamente proporcional tanto a la rapidez de rotación como a la distancia radial.²

Rapidez tangencial $\sim$ distancia radial $\times$ rapidez rotacional.

En forma simbólica:

$$v \sim r\omega$$

donde v es la rapidez tangencial y ω (letra griega omega) es la rapidez de rotación. Una persona se mueve más rápido si la rapidez de rotación aumenta (mayor ω). También se moverá más rápido si se aleja del eje (mayor r). Si se coloca dos veces más allá del eje de rotación en el centro, se moverá el doble de rápido. Si se colocas tres veces más allá, tendrá el triple de rapidez tangencial. Si una persona se encuentra en cualquier tipo de sistema de rotación, su rapidez tangencial dependerá de qué tan lejos se encuentre del eje de rotación.

EXAMÍNAME

1. Imagina que vas en una plataforma giratoria grande como la de la figura 8.3. Si te sientas a medio camino entre el eje de rotación y la orilla, y tu rapidez de rotación es de 20 RPM, y tu rapidez tangencial es de 2 m/s, ¿cuáles serán las rapidez de rotación y tangencial de tu amigo que está sentado en la orilla?
2. Los trenes avanzan por un par de rieles. Para el movimiento rectilíneo, ambos rieles tienen la misma longitud, lo cual no es así cuando se trata de los rieles en una curva. ¿Qué riel será más largo: el del lado externo o el del lado interno de la curva?

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Como la plataforma rotatoria es rígida, todas sus partes tienen la misma rapidez rotacional, por lo que tu amigo también gira a 20 RPM. La rapidez tangencial es algo diferente: Como está al doble de distancia del eje de rotación que tú, se moverá con el doble de rapidez, es decir, a 4 m/s.
2. Al igual que en la figura 8.1, en una curva el riel exterior es más largo, así como es más grande la circunferencia de un círculo con radio mayor.

² Si estás tomando un curso continuo de física, aprenderás que cuando se usan las unidades correctas para la rapidez tangencial v , la rapidez de rotación ω y la distancia radial r , la proporción directa entre v y r y ω al mismo tiempo se transforma en la ecuación exacta $v = r\omega$. Así, la rapidez tangencial es directamente proporcional a r , cuando todas las partes de un sistema tengan simultáneamente la misma ω , como en el caso de una rueda, un disco o una vara rígida. (La proporcionalidad directa entre v y r no es válida en los planetas, porque los planetas tienen diferente rapidez de rotación.)

RUEDAS DE FERROCARRIL

¿Por qué un ferrocarril se mantiene sobre los rieles? La mayoría de la gente supone que las cejas de las ruedas evitan que se descarrile. Pero si te fijas en esas cejas quizá veas que están oxidadas. Casi nunca tocan el riel, excepto cuando entran en las ranuras que dirigen al tren de una vía a otra. Entonces, ¿cómo las ruedas de un tren permanecen en los rieles? Se quedan en la vía porque son ligeramente cónicas.

Si ruedas un vaso cónico por una superficie, describe una trayectoria circular (figura 8.4). La parte más ancha del vaso tiene mayor radio, rueda más distancia en cada revolución y, por ende, tiene mayor rapidez tangencial que el fondo. Si pegas entre sí un par de vasos en sus bocas (sólo con una cinta adhesiva) y los pones a rodar por un par de carriles paralelos (figura 8.5), los vasos quedarán sobre la vía y se centrarán siempre que estén rodando fuera del centro. Esto se debe a que cuando el par rueda, por ejemplo, hacia la izquierda del centro, la parte más amplia del vaso izquierdo queda sobre el carril izquierdo, mientras que la parte angosta del vaso derecho va sobre el carril derecho. Esto dirige al par hacia el centro. Si se "pasa" hacia la derecha se repite el proceso, esta vez hacia la izquierda, porque las ruedas se tienden a centrar a sí mismas. Igual sucede en un ferrocarril, donde los pasajeros sienten que el vagón oscila cuando suceden estas correcciones.

Esta forma cónica es esencial en las curvas de las vías. En cualquier curva, la distancia medida en el riel exterior es mayor que la medida en el riel interior (como vimos en la figura 8.1). Entonces, siempre que un vehículo toma una curva, sus ruedas externas viajan con más rapidez que sus ruedas internas. Un automóvil no tiene este problema, porque las ruedas están libres y ruedan independientemente entre sí. No obstante, en un tren, como el par de vasos pegados, los pares de ruedas están unidas firmemente, de tal modo que giran juntas. En cualquier momento, las ruedas opuestas tienen las mismas RPM. Pero debido a que la rueda tiene una ligera conicidad, su rapidez en la vía depende de si gira en la parte angosta de la rueda o en la parte amplia. En esta última se mueve con más rapidez. Así, cuando un tren toma una curva, las ruedas del riel exterior se apoyan en la parte amplia de conicidad, en tanto que las ruedas opuestas se sostienen en sus partes angostas. De este modo las ruedas

tienen rapidez tangenciales diferentes con la misma rapidez de rotación. ¡Esto es $v \sim r\omega$ en acción! ¿Puedes ver que si las ruedas no fueran cónicas habría fricción, y las ruedas rechinarían cuando el tren tomara la curva?

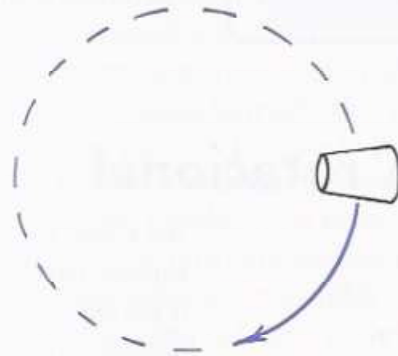


FIGURA 8.4

Como la parte ancha del vaso rueda con más rapidez que la parte angosta, el vaso describe una curva, al rodar.

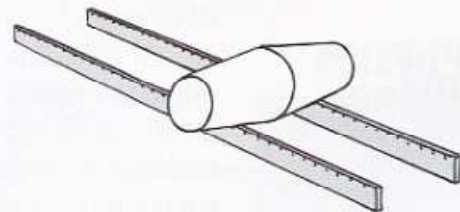


FIGURA 8.5

Un par de vasos pegados permanece en los rieles al rodar, porque cuando ruedan, saliéndose del centro, las distintas rapidez tangenciales que a la vez se deben a la conicidad, hacen que se corrija sola y vaya al centro de los rieles.

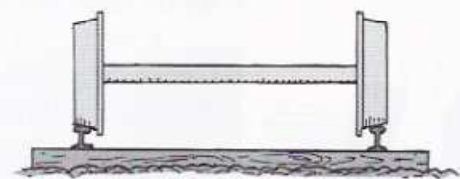
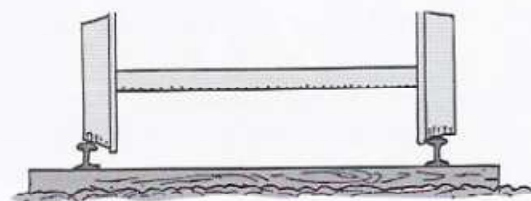


FIGURA 8.6

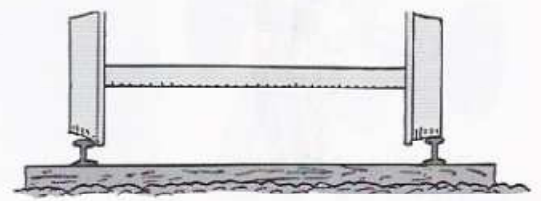
Las ruedas de un ferrocarril son ligeramente cónicas (aquí se ven muy exageradas).

FIGURA 8.7

(Izquierda) En el riel que describe una curva a la izquierda, la rueda derecha gira sobre su parte ancha y va más rápido, mientras que la rueda izquierda se apoya en su parte angosta y va más lento. (Derecha) Lo contrario cuando la curva es a la derecha



La parte angosta de la rueda izquierda va más lento, y así las ruedas se dirigen hacia la izquierda



La parte ancha de la rueda izquierda va más rápido, y así las ruedas se dirigen hacia la derecha



¿Por qué una persona con una pierna más corta que la otra caminará en círculos cuando se pierde en un bosque?

¡EUREKA!

Cuando la rapidez tangencial cambia, hablamos de *aceleración tangencial*. Cualquier cambio en la rapidez tangencial indica una aceleración en la dirección del movimiento tangencial. Por ejemplo, una persona en una plataforma giratoria que acelera o desacelera sufre una aceleración tangencial. Pronto veremos que todo lo que se mueve en una trayectoria curva sufre otra clase de aceleración, la que se dirige al centro de la curvatura. Ésta es la *aceleración centrípeta*, a la cual volveremos más adelante en este capítulo.

Inercia rotacional



Inercia rotacional usando tubos cargados
Inercia rotacional usando un martillo
Inercia rotacional con una varilla cargada

Así como un objeto en reposo tiende a permanecer en reposo, y un objeto en movimiento tiende a permanecer moviéndose en línea recta, *un objeto que gira en torno a un eje tiende a permanecer girando alrededor de ese eje, a menos que interfiera alguna influencia externa*. (En breve veremos que a tal influencia externa se le llama *momento de torsión* o *torque*.) La propiedad que tiene un objeto para resistir cambios en su estado de movimiento giratorio se llama *inercia rotacional*.³ Los cuerpos que giran tienden a permanecer girando; mientras que los que no giran tienden a permanecer sin girar. En ausencia de influencias externas, un trompo giratorio sigue girando; en tanto que uno en reposo permanecerá en reposo.

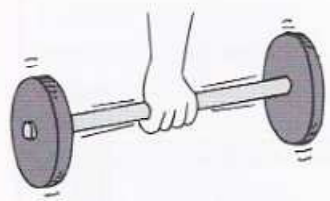
Al igual que la inercia del movimiento rectilíneo, la inercia rotacional de un objeto depende también de su masa. El grueso disco de piedra que gira bajo un torno de alfarero es muy masivo, y una vez que empieza a girar, tiende a permanecer girando. Sin embargo, a diferencia del movimiento rectilíneo, la inercia rotacional depende de la distribución de la masa en relación con el eje de rotación. Cuanto más grande sea la distancia entre el grueso de la masa de un objeto y su eje de rotación, será mayor su inercia rotacional. Esto se observa en los volantes tipo industrial, que se fabrican de tal manera que la mayoría de su masa se concentra alejada del eje, en la orilla. Una vez que empiezan a girar tienen mayor tendencia a permanecer girando. Cuando están en reposo son más difíciles de hacerlos girar.

Cuanto mayor sea la inercia rotacional de un objeto, más difícil será cambiar su estado de rotación. Esto lo emplean los equilibristas que caminan por una cuerda sosteniendo una pértiga larga, para ayudarse a conservar el equilibrio. Gran parte de la pértiga está alejada de su eje de rotación, que es el punto medio. En consecuencia, la pértiga tiene mucha inercia rotacional. Si el equilibrista comienza a inclinarse, sus manos comenzarán a hacer girar la pértiga. Pero la inercia rotacional de la pértiga se resiste a girar, y da tiempo al equilibrista para reajustar su equilibrio. Cuanto más larga sea la pértiga, mejor. Y todavía mejor si se fijan objetos masivos a sus extremos. Sin embargo, un equilibrista sin pértiga puede al menos extender totalmente sus brazos para aumentar la inercia rotacional del cuerpo.

La inercia rotacional de la pértiga, o de cualquier otro objeto, depende del eje en torno al cual gira.⁴ Compara las distintas rotaciones de un lápiz. Considera tres ejes: primero, el que pasa por la puntilla y es paralelo a la longitud del lápiz; segundo, a la mitad del lápiz y perpendicular a él; y tercero el perpendicular al



Fácil de balancear



Difícil de balancear

FIGURA 8.8

La inercia rotacional depende de la distribución de la masa respecto al eje de rotación.

³ Que con frecuencia se llama *momento de inercia*.

⁴ Cuando la masa de un objeto se concentra en un radio r del eje de rotación (como en la lenteja de un péndulo simple o en un anillo delgado) la inercia rotacional I es igual a la masa m multiplicada por el cuadrado de la distancia radial. Para este caso especial, $I = mr^2$.



Para aumentar la eficiencia de los viajes en tren, una idea que se puso en práctica en el pasado era colocar discos masivos —rotores— debajo del piso de los vagones del ferrocarril. Al aplicar los frenos para reducir la rapidez de los carros, en vez de convertir la energía de frenado en calor mediante fricción, la energía se desviaba para hacer girar los rotores. Su energía cinética de rotación se utilizaba entonces para operar el tren. El gran tamaño de los rotores volvió impráctico el sistema. Pero la idea no se desechó. En la actualidad, los automóviles híbridos hacen lo mismo, aunque no de forma mecánica, sino eléctrica. La energía de frenado se desvía hacia las baterías eléctricas, que luego utilizan para operar el automóvil.

EUREKA!

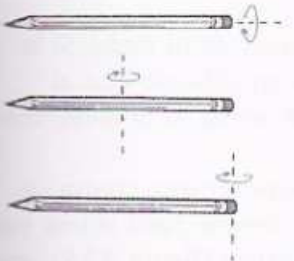


FIGURA 8.10
El lápiz tiene distintas inercias rotacionales respecto a los distintos ejes de rotación.

lápiz, en un extremo. La inercia rotacional es muy pequeña respecto a la primera posición y es fácil girar el lápiz entre tus dedos, porque la mayor parte de la masa está muy cerca del eje. Respecto al segundo eje, como en el caso del equilibrista de la figura 8.9, es mayor la inercia rotacional. Respecto al tercero, en el extremo del lápiz para que oscile como un péndulo, la inercia rotacional es todavía mayor.

Un bat de béisbol largo, sujeto cerca del extremo, tiene más inercia rotacional que uno corto. Una vez blandiéndolo tiene más tendencia a mantenerse así; pero será más difícil aumentar su rapidez. Un bat corto, con menos inercia rotacional, es más fácil de blandir, y eso explica por qué los buenos bateadores a veces “acortan” el bat sujetándolo más cerca de su extremo masivo. De igual forma, cuando corres con las piernas flexionadas reduces la inercia rotacional y entonces las puedes hacer girar hacia adelante y hacia atrás con más rapidez. Una persona con piernas largas tiende a caminar con pasos más lentos que una persona con piernas cortas. Los distintos pasos dados por criaturas con distintas longitudes de pierna se distinguen especialmente en los animales, como jirafas, caballos y avestruces, que corren con paso más pausado que los perros salchicha, ratones e insectos.



FIGURA 8.9

La tendencia de la pértiga a resistir la rotación ayuda al acróbata.



FIGURA 8.11

Las piernas cortas tienen menos inercia de rotación que las largas. Un animal con patas cortas tiene un paso más rápido que uno con patas largas, así como un bateador puede abanicar un bat más corto con más rapidez que uno largo.



FIGURA 8.12

Cuando corres doblas las piernas para reducir la inercia rotacional.

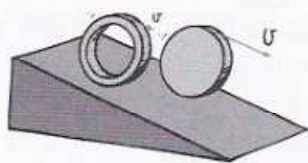


FIGURA 8.13

Un cilindro macizo rueda con más rapidez al bajar un plano inclinado que un anillo, aunque las masas sean iguales o distintas, o los diámetros externos sean iguales o distintos. Un anillo tiene más inercia rotacional en relación con su masa que un cilindro.

A causa de la inercia rotacional, un cilindro macizo que parte del reposo rueda de bajada por un plano inclinado con mayor velocidad que un anillo o aro. Ambos giran en torno a su eje central, y debido a la forma que tiene, el que tiene más masa lejos de su eje, es el aro. Así, respecto a la distribución de su peso, un aro tiene más inercia rotacional y es más difícil de ponerlo a rodar. Cualquier cilindro macizo le ganará a cualquier anillo en el mismo plano inclinado. Al inicio parecerá imposible, aunque recuerda que dos objetos cualesquiera, independientemente de su masa, caen juntos cuando se les suelta. También se deslizarán juntos por un plano inclinado cuando se les suelta. Cuando se presenta la rotación, el objeto que tenga la mayor inercia rotacional *en relación con su propia masa* tiene la mayor resistencia a cambiar su movimiento. Por consiguiente, cualquier cilindro macizo rodará de bajada por cualquier plano inclinado con mayor aceleración que cualquier cilindro hueco, independientemente de su masa o de su radio. Un cilindro hueco tiene mayor "indolencia por masa" que un cilindro macizo. ¡Haz la prueba!

La figura 8.14 compara las inercias rotacionales de varias formas y ejes. No es importante para ti el aprender estos valores, pero puedes ver cómo varían según la forma y el eje.

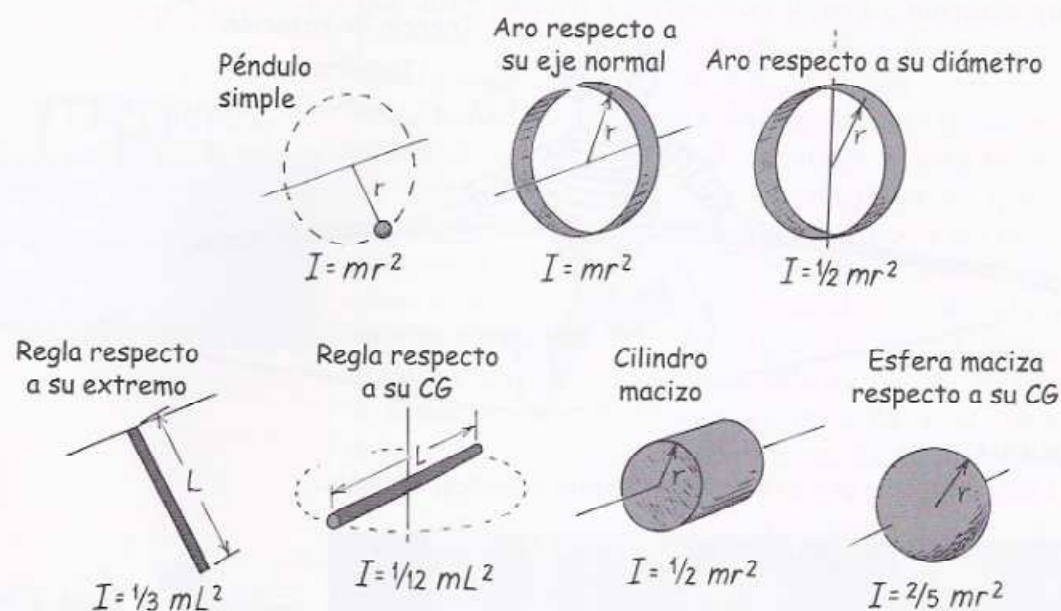


FIGURA 8.14

Inercias rotacionales de diversos objetos, cada uno con masa m , respecto a los ejes indicados.

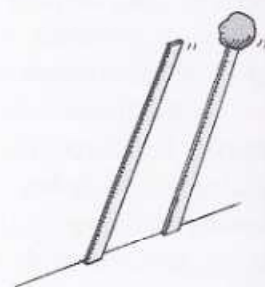
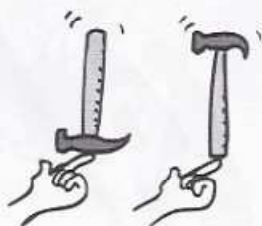


FIGURA 8.15

¿Cuál regla tiene la mayor inercia rotacional respecto a su extremo inferior? Cuando se dejan caer, ¿cuál de ellas al rotar llegará primero al suelo?



EXAMÍNA TE

1. Considera equilibrar verticalmente un martillo en la punta de tu dedo. Si la cabeza es pesada y el mango es largo, ¿sería más fácil equilibrarlo con el extremo del mango en el dedo para que la cabeza esté arriba, o al revés, con la cabeza en el dedo y el mango hacia arriba?
2. Un par de reglas de un metro están recargadas casi verticalmente contra un muro. Si las sueltas girarán hasta el piso en el mismo tiempo. Pero si una tiene una bola masiva de plastilina pegada a su extremo superior (figura 8.15), ¿qué sucederá? ¿Llegará al suelo en un tiempo más largo o más corto?
3. Sólo para divertirte, y como estamos describiendo cosas redondas, ¿por qué las tapas de los registros tienen forma circular?

Momento de torsión (torque)



Diferencia entre momento de torsión y peso
Por qué una esfera rueda hacia abajo por una colina



Cuando todos los relojes sean digitales, ¿tendrán algún significado las expresiones “en el sentido de las manecillas del reloj” y “en sentido contrario a las manecillas del reloj”?

EUREKA!

Sujeta con la mano el extremo de una regla de un metro, horizontalmente. Coloca algo pesado cerca de la mano y agita la regla; podrás sentir la torsión de la regla. Ahora coloca el peso más alejado de la mano y la torsión será mayor. Pero el peso es igual. La fuerza que actúa sobre la mano es la misma. Lo que es distinto es el *momento de torsión*.

Un momento de torsión es la contraparte rotacional de la fuerza. La fuerza tiende a cambiar el movimiento de las cosas; el momento de torsión tiende a torcer, o cambiar, el estado de rotación de las cosas. Si deseas hacer que se mueva un objeto en reposo, aplícale una fuerza. Si deseas que comience a girar un objeto en reposo, aplícale un momento de torsión.

El momento de torsión es distinto de la fuerza, así como la inercia rotacional es distinta de la inercia normal. Tanto el momento de torsión como la inercia rotacional implican una distancia al eje de rotación. En el caso del momento de torsión, esa distancia, que se puede considerar que tiende proporcionar equilibrio, se llama *brazo de palanca*. Es la distancia más corta entre la fuerza aplicada y el eje de rotación. Definiremos el **momento de torsión** como el producto de este brazo de palanca por la fuerza que tiende a producir la rotación:

$$\text{Momento de torsión} = \text{brazo de palanca} \times \text{fuerza}$$

Los niños adquieren la intuición del momento de torsión cuando juegan en el sube y baja. Se pueden equilibrar en él, aunque tengan distintos pesos. Sólo el peso no produce la rotación. El momento de torsión sí, y los niños pronto apren-

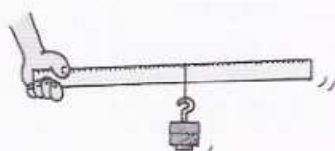


FIGURA 8.16

Aleja la pesa de la mano y sentirás la diferencia entre fuerza y momento de torsión.



FIGURA 8.17

Desde la antigüedad se ha medido la masa equilibrando momentos de torsión.

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Colocando el martillo vertical sostenido con la punta del dedo en el mango y la cabeza hacia arriba. ¿Por qué? Porque de esta forma tendrá más inercia rotacional y será más resistente a los cambios de rotación. Los acróbatas que ves en el circo, que equilibran a sus amigos en la punta de un poste largo tienen una tarea más fácil cuando están en la punta. Un poste sin ningún acróbata en la punta tiene menor inercia rotacional ¡y será más difícil de equilibrar!
2. ¡Haz la prueba! (Si no tienes plastilina, consigue algo equivalente.)
3. Ten paciencia por el momento. Piénsalo bien si no tienes la respuesta. A continuación pasa al final del capítulo y ve la respuesta.

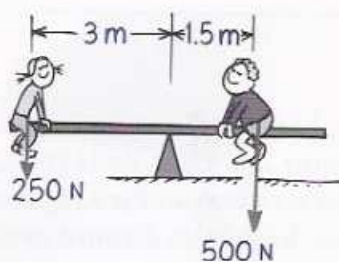


FIGURA 8.18

Figura interactiva

No se produce rotación cuando los momentos de torsión se equilibran entre sí.

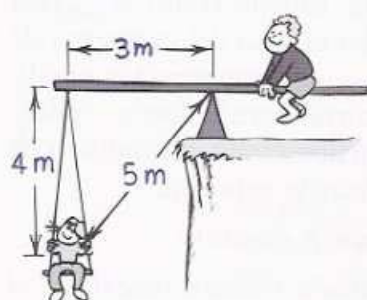


FIGURA 8.19

El brazo de palanca sigue siendo de 3 m.

FIGURA 8.20

Figura interactiva

Aunque las magnitudes de la fuerza son iguales en cada caso, los momentos de torsión son distintos.



EXAMÍNAME

1. Si con un tubo se prolonga el mango de una llave hasta tres veces su longitud, ¿cuánto aumentará el momento de torsión con la misma fuerza aplicada?
2. Acerca del sube y baja equilibrado de la figura 8.18, supón que la niña de la izquierda de repente aumenta su peso en 50 N, por ejemplo, porque le dan una bolsa de manzanas. ¿Dónde se debería sentar entonces para quedar equilibrada, suponiendo que el pesado niño no se mueve?

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Tres veces más palanca con la misma fuerza resulta en un momento de torsión tres veces mayor. (Precaución: Esta técnica para incrementar el momento de torsión, ¡a veces causa que los tornillos se barran o se trocen!)
2. Debería sentarse $\frac{1}{2}$ m más cerca del centro. Entonces el brazo de palanca será 2.5 m. Esto coincide: $300 \text{ N} \times 2.5 \text{ m} = 500 \text{ N} \times 1.5 \text{ m}$.

Centro de masa y centro de gravedad

Lanza al aire una pelota de béisbol y describirá una trayectoria parabólica uniforme. Lanza un bat girando en el aire y su trayectoria no será uniforme, pues su movimiento será tambaleante; parece que cabecea por donde quiera. Pero lo cierto es que se tambalea respecto a un lugar muy especial: un punto llamado **centro de masa (CM)**.

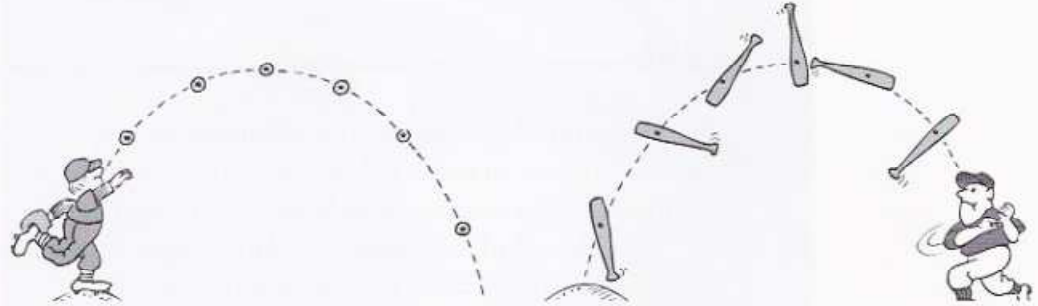


FIGURA 8.21

El centro de masa de la pelota y el del bat describen trayectorias parabólicas.

Para un cuerpo determinado, el centro de masa es la posición promedio de toda la masa que lo forma. Por ejemplo, un objeto simétrico, como una pelota, tiene su centro de masa en su centro geométrico. En cambio, un cuerpo de forma irregular, como un bat de béisbol, tiene más de su masa cerca de uno de sus extremos. Por lo tanto, el centro de masa de un bat queda hacia el extremo más grueso. Un cono macizo tiene su centro de masa exactamente a un cuarto de la distancia de su base hacia arriba.

El **centro de gravedad (CG)** es como la mayoría de la gente llama al centro de masa. El centro de gravedad no es más que la posición promedio de la distribución del peso. Como el peso y la masa son proporcionales entre sí, el centro de gravedad y el centro de masa se refieren al mismo punto de un objeto.⁵ El físico prefiere usar el término *centro de masa*, porque un objeto tiene centro de masa, esté o no bajo la influencia de la gravedad. Sin embargo, usaremos cualquiera de esos términos para expresar este concepto, y cuando el peso entre en perspectiva, usaremos *centro de gravedad*.

La fotografía con destello estroboscópico (figura 8.23) muestra una vista superior de una llave que se desliza por una superficie horizontal lisa. Observa que su centro de masa, indicado por el punto blanco, describe una trayectoria rectilínea; mientras que las demás partes cabecean al avanzar por la superficie. Como no hay fuerza externa que actúe sobre la llave, su centro de masa recorre

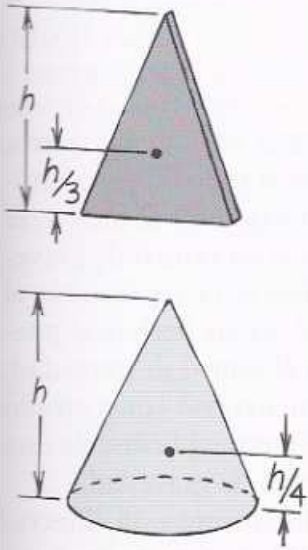


FIGURA 8.22

El centro de masa de cada objeto se indica con el punto.

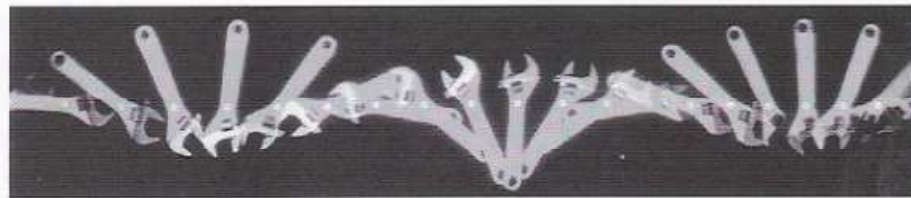


FIGURA 8.23

El centro de masa de la llave que sale girando describe una trayectoria rectilínea.

⁵ Estos términos son indistintos para casi todos los objetos sobre y cerca de la Tierra. quizás haya una pequeña diferencia entre centro de gravedad y centro de masa, cuando un objeto tiene el tamaño suficiente como para que la aceleración de la gravedad varíe de una parte a otra del mismo. Por ejemplo, el centro de gravedad del edificio Empire State está más o menos a 1 milímetro abajo de su centro de masa. Esto se debe a que los pisos inferiores son atraídos con más fuerza por la gravedad de la Tierra que los superiores. Para los objetos cotidianos, incluyendo los rascacielos, se pueden usar en forma indistinta los términos *centro de gravedad* y *centro de masa*.

FIGURA 8.24

El centro de masa del proyectil y de los fragmentos describe la misma trayectoria, antes y después del estallido.

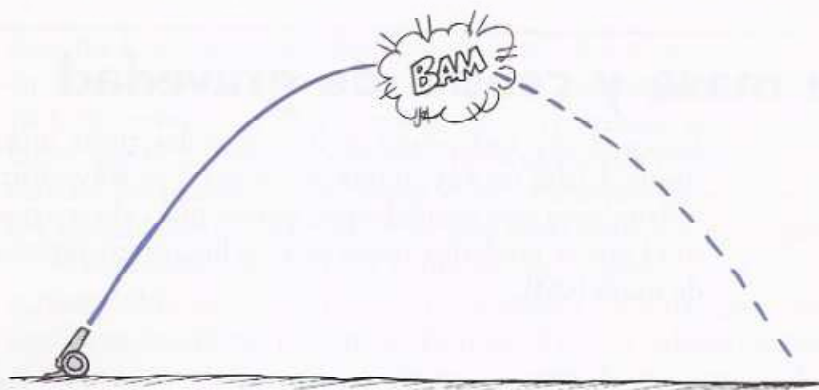


FIGURA 8.25

El peso de toda la regla se comporta como si estuviera concentrado su punto medio

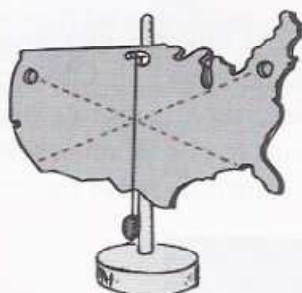


FIGURA 8.26

Determinación del centro de gravedad de un objeto de forma irregular.

distancias iguales en intervalos de tiempo iguales. El movimiento de la llave giratoria es la combinación del movimiento rectilíneo de su centro de masa y el movimiento de rotación en torno a su centro de masa.

Si la llave hubiera sido arrojada al aire, su centro de masa (o centro de gravedad) describiría una parábola uniforme, independientemente de la forma en que girase. Lo mismo sucede en una granada que estalla (figura 8.24). Las fuerzas internas que actúan en la explosión no cambian el centro de gravedad del proyectil. Es interesante que si no hubiera resistencia del aire, el centro de gravedad de los fragmentos dispersos, al volar por el aire, estaría en el mismo lugar que el centro de gravedad de la granada si ésta no hubiera estallado.

EXAMÍNATE

1. ¿Dónde está el centro de gravedad de una rosquilla (dona)?
2. ¿Un objeto puede tener más de un centro de gravedad?

Ubicación del centro de gravedad

El centro de gravedad de un objeto uniforme, por ejemplo una regla de un metro, está en su punto medio, porque la regla se comporta como si todo su peso estuviera concentrado ahí. Al soportar ese único punto se soporta todo el metro. El equilibrio de un objeto ofrece un método sencillo para ubicar su centro de gravedad. En la figura 8.25 se muestran muchas flechas pequeñas para representar el tirón de la gravedad a lo largo de la regla de un metro. Todas esas flechas se pueden sumar para obtener una fuerza resultante que actúa en el centro de gravedad. Se puede uno imaginar que todo el peso de la regla de un metro está concentrado en este único punto. En consecuencia podemos equilibrar el metro aplicándole una sola fuerza hacia arriba, de tal manera que pase por su centro de gravedad.

El centro de gravedad de cualquier objeto colgado libremente está directamente abajo de su punto de suspensión (o en él) (figura 8.26). Si se traza una vertical por el punto de suspensión, el centro de gravedad estará en algún lugar de esa línea. Para determinar con exactitud dónde está, sólo hay que colgar al objeto de

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. ¡En el centro del agujero!
2. No, un objeto rígido tiene un solo CG. Si no es rígido, como una pieza de lodo o de plastilina, y se cambia su forma, entonces su CG cambiará conforme cambie su forma. Pero aun así tiene únicamente un CG para cualquier forma dada.

FIGURA 8.27

El atleta ejecuta un salto "de Fosbury" para salvar la barra, mientras que su centro de gravedad pasa por abajo de la barra.



FIGURA 8.28

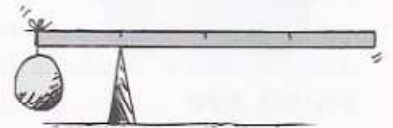
El centro de masa puede estar fuera de la masa de un cuerpo.

otro punto y trazar una segunda recta vertical que pase por ese punto de suspensión. Entonces, el centro de gravedad está donde se cruzan las dos líneas.

El centro de masa de un objeto puede estar en un punto donde no exista masa del objeto. Por ejemplo, el centro de masa de un anillo o de una esfera hueca está en el centro geométrico de esos cuerpos, donde no hay materia. Asimismo, el centro de masa de un *boomerang* está fuera de su estructura física, y no dentro del material que lo forma (figura 8.28).

EXAMÍNA TE

1. ¿Dónde está el centro de masa de la atmósfera de la Tierra?
2. Un metro uniforme de madera apoyado en la marca de 25 cm se equilibra cuando una roca de 1 kg se cuelga en el extremo de 0 cm. ¿Cuál es la masa del metro de madera?

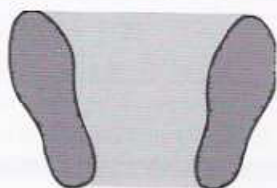


COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

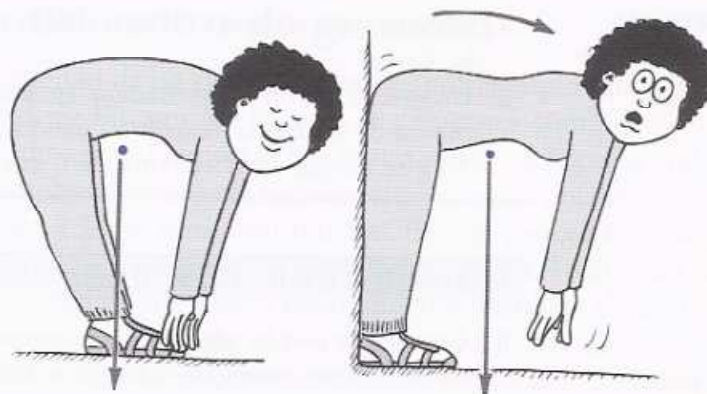
1. Como una pelota gigante de baloncesto, la atmósfera de la Tierra es una concha esférica cuyo centro de masa es el centro de la Tierra.
2. La masa del metro de madera es de 1 kg. ¿Por qué? El sistema está en equilibrio, así que los momentos de torsión deben equilibrarse. El momento de torsión producido por el peso de la roca se equilibra con el momento de torsión igual pero opuesto que produce el peso del metro aplicado en su CG, la marca de 50 cm. La fuerza de apoyo en la marca de 25 cm se aplica a la mitad del camino entre la roca y el CG del metro, así que los brazos de la palanca en torno al punto de apoyo son iguales (25 cm). Esto significa que los pesos (y, por lo tanto, las masas) de la roca y del metro de madera también deben ser iguales. (Nota que no tenemos que realizar la laboriosa tarea de considerar las partes fraccionarias del peso del metro de madera a cada lado del punto de apoyo, pues el CG de todo el metro en realidad está en un punto: ¡la marca de 50 cm!) Es interesante destacar que el CG del *sistema roca + metro* está en la marca de 25 cm, directamente encima del punto de apoyo.

**FIGURA 8.29**

El centro de gravedad de la Torre Inclinada de Pisa está arriba de su base de soporte, y la torre está en equilibrio estable.

**FIGURA 8.30**

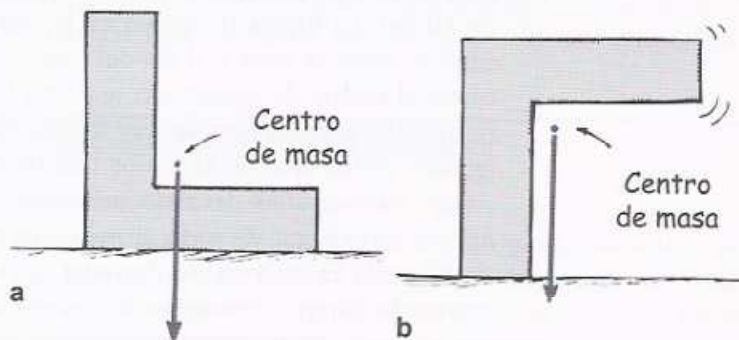
Cuando estás de pie, tu centro de gravedad está en algún lugar sobre la zona delimitada por los pies. ¿Por qué mantienes separadas las piernas cuando viajas de pie en un autobús que va por un terreno accidentado?

**FIGURA 8.31**

Puedes inclinarte y tocarte los dedos de los pies sin caerte, sólo si tu centro de gravedad está arriba de la zona delimitada por los pies.

FIGURA 8.32

El centro de masa del objeto en forma de L está donde no hay masa. En a) el centro de masa está arriba de la base de soporte, por lo cual el objeto es estable. En b) no está arriba de la base de soporte, de manera que el objeto es inestable y se volteará.



Estabilidad

El lugar del centro de masa es importante en la estabilidad (figura 8.29). Si trazamos una vertical hacia abajo desde el centro de gravedad de un objeto de cualquier forma, y cae dentro de la base de ese objeto, quiere decir que está en equilibrio estable: permanecerá en equilibrio. Si cae fuera de la base, es inestable. ¿Por qué no se viene abajo la famosa Torre Inclinada de Pisa? Como se observa en la figura 8.29, una línea que va del centro de gravedad de esa torre cae dentro de su base, y es la causa de que la Torre Inclinada haya estado de pie durante siglos. Si la Torre se inclinara lo suficiente para que el centro de gravedad quedara más allá de la base, un momento de torsión desequilibrado haría que se viniera abajo.

Para reducir la probabilidad de un volteo, es preferible diseñar los objetos con una base amplia y un centro de gravedad bajo. Cuanto más amplia sea la base, se deberá elevar más el centro de gravedad, antes de que el objeto se voltee o de caiga.

Cuando estás de pie (o estás acostado) tu centro de gravedad está dentro de tu cuerpo. ¿Por qué el centro de gravedad de una mujer promedio está más bajo que el de un hombre promedio de la misma estatura? ¿Está el centro de gravedad siempre en el mismo punto de tu cuerpo? ¿Está siempre dentro de ti? ¿Qué le sucede cuando te flexionas?

Si eres bastante flexible, podrás doblarte y tocarte los dedos de los pies sin doblar las rodillas. Comúnmente, cuando te flexionas y te tocas los dedos de los pies, alargas las extremidades inferiores, como muestra la figura 8.31 (izquierda), de tal modo que tu centro de gravedad está sobre una base de soporte, que son los pies. Pero si tratas de hacer lo mismo recargado en una pared, no te podrás equilibrar, porque tu centro de gravedad se saldrá de los pies, como se observa en la figura 8.31 (derecha).

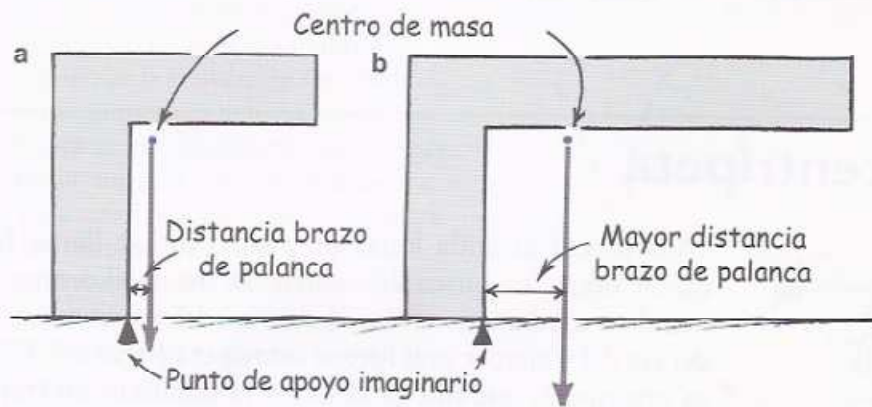
FIGURA 8.33

¿Dónde está el centro de gravedad de Alexei en relación con las manos?



FIGURA 8.34

Un momento de torsión mayor actúa sobre la figura en b) por dos razones. ¿Cuáles son esas razones?



Giras a causa de un momento de torsión desequilibrado. Esto se observa con claridad en los dos objetos en forma de L de la figura 8.34. Los dos son inestables y se vendrán abajo, a menos que se sujeten a la superficie horizontal. Es fácil de ver que si las dos formas tienen el mismo peso, la de la derecha es más inestable. Esto se debe a su mayor brazo de palanca y, en consecuencia, a su mayor momento de torsión.

Trata de equilibrar el extremo del mango de una escoba, de forma vertical sobre la palma de la mano. Su base de soporte es muy pequeña, y está relativamente lejos y abajo del centro de gravedad, por lo que es difícil mantener ese equilibrio durante mucho tiempo. Después de practicar lo podrás hacer con movimientos pequeños de tu mano, que respondan exactamente a las variaciones del equilibrio. Aprenderás a no corregir demasiado y a coordinar más, según el caso, las pequeñas variaciones del equilibrio. El sorprendente transporte de Segway para seres humanos (figura 8.35) hace esto. Las variaciones en el equilibrio se detectan con rapidez por los giroscopios, en tanto que una computadora interna de alta velocidad regula el motor para mantener el vehículo en posición vertical. La computadora controla los ajustes correctivos de la rapidez de la rueda, en una forma muy parecida a la manera en que tu cerebro coordina tus acciones de ajuste cuando equilibras la escoba en la palma de tu mano. Ambos logros son realmente asombrosos.

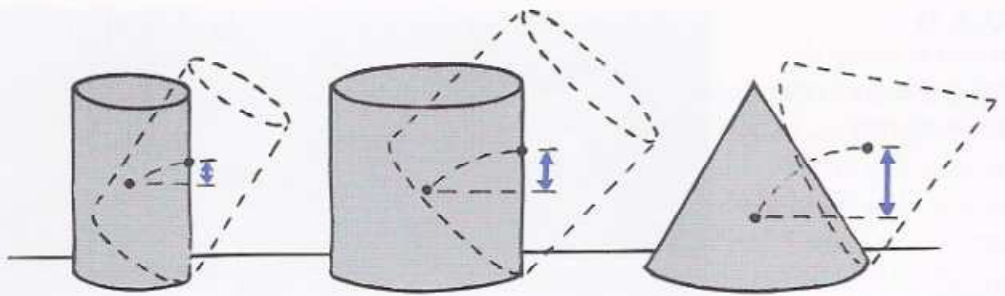


FIGURA 8.35

Los giroscopios y los motores asistidos por computadora en el vehículo de Segway hacen continuos ajustes para mantener el CG combinado de Lilian y el vehículo arriba de la base de las ruedas.

FIGURA 8.36

La estabilidad está determinada por la distancia vertical que el centro de gravedad se eleva cuando se inclina. Un objeto con una base ancha y un centro de gravedad más bajo es más estable.



EXAMÍNAME

1. ¿Por qué es peligroso abrir los cajones superiores de un archivero completamente lleno que no esté asegurado con firmeza al piso?
2. Cuando un automóvil cae por un precipicio, ¿por qué gira hacia delante conforme cae?



Fuerza centrípeta



FIGURA 8.37

La fuerza ejercida sobre la lata que gira es hacia el centro.

Toda fuerza dirigida hacia un centro fijo se llama **fuerza centrípeta**. *Centrípeta* quiere decir “en busca del centro” o “hacia el centro”. Si damos vuelta a una lata metálica atada al extremo de un cordel, vemos que tenemos que seguir tirando del cordel y ejercer una fuerza centrípeta (figura 8.37). El cordel transmite la fuerza centrípeta, que tira de la lata y la mantiene en trayectoria circular. Las fuerzas gravitacionales y eléctricas pueden producir fuerzas centrípetas. Por ejemplo, la Luna se mantiene en una órbita casi circular debido a la fuerza gravitacional dirigida hacia el centro de la Tierra. Los electrones en órbita de los átomos sienten una fuerza eléctrica dirigida hacia el centro de los núcleos. Todo objeto que se mueve en una trayectoria circular está experimentando fuerza centrípeta.

La fuerza centrípeta depende de la masa m , de la rapidez tangencial v y el radio de curvatura r del objeto en movimiento circular. En el laboratorio probablemente usarás la ecuación exacta

$$F = mv^2/r.$$

Observa que la rapidez está al cuadrado, de manera que para duplicar la rapidez se requiere multiplicar la fuerza por cuatro. La relación inversa con el radio de curvatura nos indica que la mitad de la distancia radial requiere el doble de fuerza.

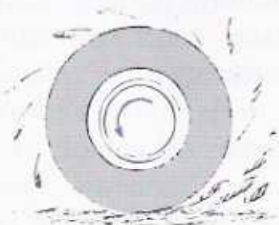


FIGURA 8.38

La fuerza centrípeta (adhesión del lodo en el neumático giratorio) no es suficiente para mantenerlo pegado al neumático, por lo que sale despedido en direcciones rectilíneas.

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. El archivero está en peligro de caerse porque el CG podría extenderse más allá de la base de apoyo. Si lo hace, entonces el momento de torsión que se debe a la gravedad hará que el archivero se venga abajo.
2. Cuando todas las ruedas están sobre el piso, el CG del automóvil está por encima de la base de apoyo. Pero, cuando el vehículo se cae por un precipicio, las ruedas delanteras son las primeras que pierden contacto con el suelo y la base de apoyo se reduce a la línea entre las ruedas traseras. Así que el CG del automóvil se extiende más allá de la base de apoyo y gira, como sucedería con la Torre Inclinada de Pisa si su CG se extendiera más allá de su base de apoyo.



FIGURA 8.39

a) Cuando un automóvil toma una curva debe haber una fuerza que lo empuje hacia el centro de la curva.
 b) Un automóvil patina en una curva cuando la fuerza centrípeta (la fricción del pavimento sobre los neumáticos) no es suficientemente grande.

La fuerza centrípeta no pertenece a una nueva clase de fuerzas, sino tan sólo es el nombre que se le da a cualquier fuerza, sea una tensión de cordel, la gravedad, fuerza eléctrica o la que sea, que se dirija hacia un centro fijo. Si el movimiento es circular y se ejecuta con rapidez constante, esta fuerza forma ángulo recto con la trayectoria del objeto en movimiento.

Cuando un automóvil da vuelta en una esquina, la fricción entre los neumáticos y el asfalto proporciona la fuerza centrípeta que lo mantiene en una trayectoria curva (figura 8.39). Si esta fricción no es suficientemente grande (a causa de aceite o grava en el pavimento, por ejemplo), el automóvil no puede tomar la curva y los neumáticos patinan hacia un lado, entonces se dice que el automóvil derrapa.

FIGURA 8.40

Las grandes fuerzas centrípetas sobre las alas del avión le permiten hacer rizados. La aceleración que aleja al avión de la trayectoria rectilínea que seguiría si no hubiera fuerza centrípeta es, con frecuencia, varias veces mayor que g , la aceleración debida a la gravedad. Por ejemplo, si la aceleración centrípeta es 49 m/s^2 (cinco veces mayor que 9.8 m/s^2), se dice que el avión sufre $5g$. En la parte inferior del rizo, el asiento oprime al piloto con una fuerza *adicional* cinco veces mayor que su peso, por lo que esa fuerza de opresión es seis veces su peso. Los aviones de combate normales se diseñan para resistir aceleraciones hasta de 8 o $9g$. Tanto el piloto como el avión deben resistir la aceleración centrípeta. Los pilotos de los aviones de combate usan trajes con presión para evitar que la sangre se aleje de la cabeza y vaya hacia las piernas, lo cual les podría causar un desmayo.

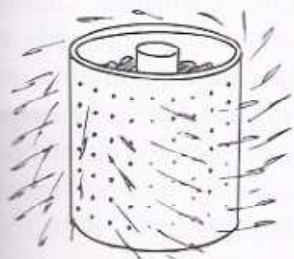
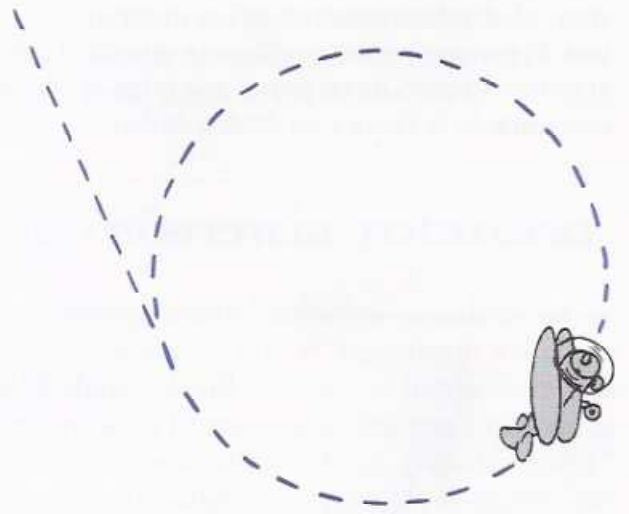


FIGURA 8.41

La ropa es forzada a seguir una trayectoria circular, pero no el agua.

La fuerza centrípeta desempeña el papel principal en el funcionamiento de una centrífuga. Un ejemplo conocido es la tina giratoria de una lavadora automática (figura 8.41). En el ciclo de exprimir gira con gran rapidez y produce una fuerza centrípeta en las prendas mojadas, que se mantienen en trayectoria circular debido a la pared interna de la tina. Ésta ejerce gran fuerza sobre la ropa, pero los agujeros que tiene evitan ejercer la misma fuerza sobre el agua que tiene la ropa. Entonces el agua escapa por tales agujeros. Estrictamente hablando, las prendas son forzadas a deshacerse del agua, y no el agua a deshacerse de las prendas. Reflexiona acerca de esto.

Fuerza centrífuga

Aunque la fuerza centrípeta es una fuerza dirigida hacia el centro, alguien dentro de un sistema en movimiento circular parecerá experimentar una fuerza hacia afuera. Esta fuerza aparente hacia afuera se llama **fuerza centrífuga**. *Centrífuga* quiere decir “que huye del centro” o “se aleja del centro”.

PRÁCTICA DE FÍSICA: BALANCEAR UN CUBO DE AGUA

Llena un cubo de agua a la mitad y hazlo girar en un círculo vertical, como lo demuestra Marshall Ellestein. El cubo y el agua aceleran hacia el centro de su trayectoria. Si giras el cubo lo suficientemente rápido, el agua no se caerá al estar arriba. Curiosamente, aunque se detuviera no caería. El truco es que hay que girar el cubo lo suficientemente rápido para que el agua se quede en el interior. ¿Puedes ver esto porque el cubo gira alrededor, el agua se mueve tangencialmente y se queda en el cubo? En el capítulo 10 aprenderemos que un transbordador espacial en órbita tampoco se cae mientras está en órbita. El truco es imprimir suficiente velocidad tangencial al transbordador, de tal forma que caiga alrededor de la curvatura de la Tierra y no dentro de ésta.

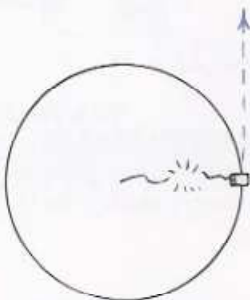
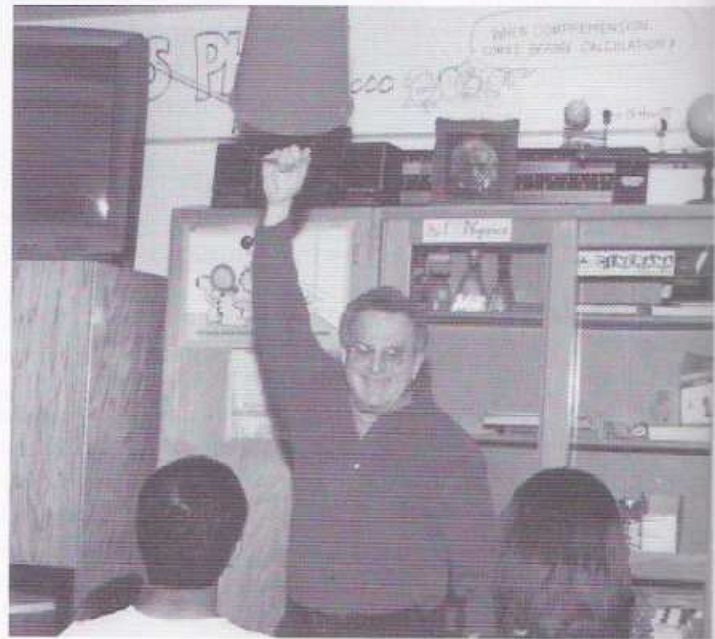


FIGURA 8.42

Cuando se rompe el cordel, la lata giratoria se mueve en línea recta, tangente y no hacia afuera del centro de su trayectoria circular anterior.

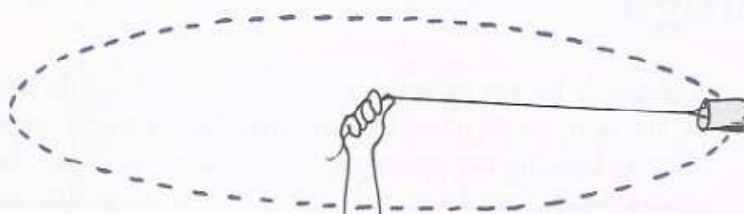
En el caso de la lata giratoria se dice, equivocadamente, que una fuerza centrífuga tira hacia afuera de la lata. Si el cordel que la sujeta se rompe (figura 8.42), la lata no se mueve circularmente hacia fuera, sino que “sale por la tangente” siguiendo una trayectoria rectilínea, porque *no* actúa fuerza sobre ella. Lo ilustraremos mejor con otro ejemplo.

Supongamos que somos pasajeros en un automóvil que de repente frena con brusquedad. Somos impulsados hacia adelante, contra el tablero de instrumentos. Cuando esto sucede no decimos que algo nos forzó hacia adelante. De acuerdo con la ley de la inercia, avanzamos hacia adelante por la ausencia de una fuerza, que hubieran podido proporcionar los cinturones de seguridad. Asimismo, cuando nos encontramos en un automóvil que da una vuelta forzada a la izquierda en una esquina, tendemos a recargarnos hacia afuera, a la derecha, no debido a que haya una fuerza centrífuga hacia afuera, sino por que ya no hay fuerza centrípeta que nos mantenga en movimiento circular (como la que ofrecen los cinturones de seguridad). La idea de que una fuerza centrífuga nos lanza contra la portezuela del automóvil es errónea. (Claro, nos empujamos contra la portezuela, pero sólo porque ésta nos empuja; es la tercera ley de Newton.)

De igual manera sucede cuando ponemos una lata metálica en trayectoria circular. No hay fuerza que tire hacia afuera de la lata, porque la única que obra sobre ella es la del cordel que tira de ella hacia adentro. La fuerza hacia afuera es sobre el cordel y no sobre la lata. Ahora supongamos que hay una catarina (o mariquita) en su interior (figura 8.44). La lata empuja contra los pies de la cata-

FIGURA 8.43

La única fuerza que obra sobre la lata giratoria (aparte de la gravedad) se dirige *hacia* el centro del movimiento circular. Es una fuerza centrípeta. Sobre la lata no actúa fuerza *hacia* afuera.



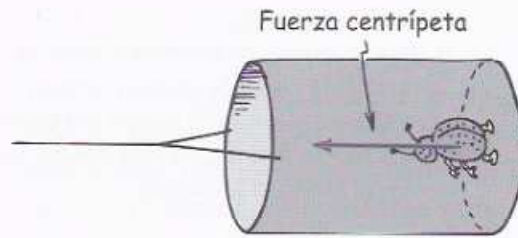


FIGURA 8.44

La lata ofrece la fuerza centrípeta necesaria para mantener a la catarina en una trayectoria circular.

rina y proporciona la fuerza centrípeta que la mantiene en una trayectoria circular. A su vez, la catarina oprime el fondo de la lata pero (sin tener en cuenta la gravedad) la única fuerza que se ejerce sobre la catarina es la de la lata sobre sus patitas. Desde nuestro marco de referencia estacionario en el exterior, vemos que no hay fuerza centrífuga que se ejerza sobre la catarina, así como no hubo fuerza centrífuga que nos lanzara contra la puertezuela del automóvil. El efecto de la fuerza centrífuga no lo causa fuerza real alguna, sino la inercia, es decir, la tendencia del objeto en movimiento a seguir una trayectoria rectilínea. Pero, ¡trata de explicárselo a la catarina!

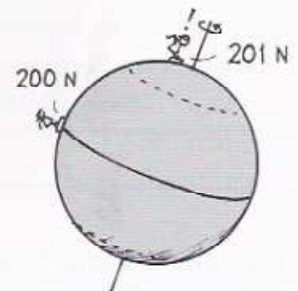
Fuerza centrífuga en un marco de referencia rotatorio

Si estamos en reposo y vemos que alguien gira una lata sobre su cabeza en un círculo horizontal, veremos que la fuerza sobre la lata es centrípeta, así como sobre la catarina que esté adentro de la lata. Para la catarina, el fondo de la lata ejerce una fuerza sobre sus patitas. Ignorando la gravedad, ninguna otra fuerza actúa sobre ella. Pero el marco de referencia puede significar una gran diferencia.⁶

En el marco de referencia rotatorio de la catarina, además de la fuerza que la lata ejerce sobre sus patitas, hay una aparente fuerza centrífuga que se ejerce sobre el insecto. La fuerza centrífuga en un marco de referencia rotatorio es una fuerza por derecho propio, tan real como el tirón de la gravedad. Sin embargo, hay una diferencia fundamental. La fuerza de gravitación es una interacción entre una y otra masa. La gravedad que sentimos es nuestra interacción con la Tierra. Pero la fuerza centrífuga en el marco de referencia rotatorio no es así; no tiene contraparte en interacción. Se siente como la gravedad, pero no hay nada que tire. Nada la produce, es un resultado de la rotación. Por tal razón los físicos dicen que es una fuerza “inercial” (o incluso *ficticia*), una fuerza *aparente*, y no una fuerza real como la gravedad, las fuerzas electromagnéticas y las fuerzas nucleares. Sin embargo, para los observadores que están en un sistema rotatorio, la fuerza centrífuga se siente igual y se interpreta como una fuerza muy real. Así como en la superficie terrestre la gravedad tiene una presencia eterna, también dentro de un sistema rotatorio la fuerza centrífuga parece estar siempre presente.

FIGURA 8.45

En el marco de referencia de la Tierra giratoria, se siente una fuerza centrífuga que hace disminuir un poco nuestro peso. Al igual que en el caballito exterior del carrusel, tenemos la máxima rapidez tangencial cuando estamos en el ecuador, más alejados del eje de la Tierra. En consecuencia, la fuerza centrífuga es máxima para nosotros cuando estamos en el ecuador, y cero en los polos, donde no tenemos rapidez tangencial. Entonces, estrictamente hablando, si deseas perder peso, ¡camina hacia el ecuador!



⁶ Un marco de referencia donde un cuerpo no presente aceleración se llama marco de referencia *inercial*. Se ve que las leyes de Newton tienen validez exacta en un marco inercial. En cambio, un marco de referencia giratorio es un marco de referencia acelerado. Las leyes de Newton no son válidas para este último.



FIGURA 8.46

Desde el marco de referencia de la catarina, en el interior de la lata giratoria, la catarina se mantiene en el fondo de la lata debido a una fuerza que se aleja del centro del movimiento circular. La catarina llama fuerza *centrífuga* a esta fuerza hacia el exterior, que para ella es tan real como la gravedad.



EXAMÍNAME

Una bala pesada de hierro está fija con un resorte a la plataforma giratoria, como se ve en el esquema. Dos observadores, uno en el marco de referencia giratorio y otro en el piso, en reposo, observan su movimiento. ¿Cuál observador ve que la bala es impulsada hacia afuera y estira el resorte? ¿Cuál observador ve que el resorte tira de la bala en un movimiento circular?

Gravedad simulada



Un hábitat en rotación no necesariamente tiene que ser una enorme rueda. La gravedad podría simularse en un par de cápsulas giratorias conectadas por un largo cable.

¡EUREKA!

Imagina una colonia de insectos llamados catarinas (mariputas) dentro de un neumático de bicicleta, de esas de ruedas anchas, con mucho espacio en su interior. Si lanzamos al aire esa rueda o la dejamos caer de un avión que vuele alto, las catarinas estarán en condición de ingravidez. Flotarán libremente mientras la rueda está en caída libre. Ahora giremos la rueda. Las catarinas se sentirán oprimidas hacia la parte exterior del interior del neumático. Si giramos la rueda no muy rápido ni muy lento, llegaremos a un punto en que las catarinas sentirán una *gravedad simulada*, como la gravedad a la que están acostumbradas. La fuerza centrífuga simula a la gravedad. La dirección "hacia abajo" para las catarinas será la que nosotros llamaríamos radial hacia afuera, alejándose del centro de la rueda.

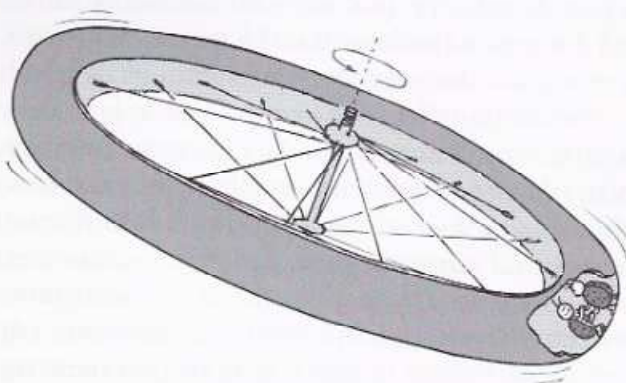


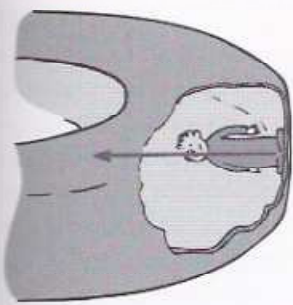
FIGURA 8.47

Si la rueda giratoria cae libremente, las catarinas en su interior sentirán una fuerza centrífuga que se siente como la gravedad, cuando gira la rueda con la rapidez adecuada. Según ellas, la dirección "hacia arriba" es hacia el centro de la rueda, y "hacia abajo" es radialmente hacia afuera.

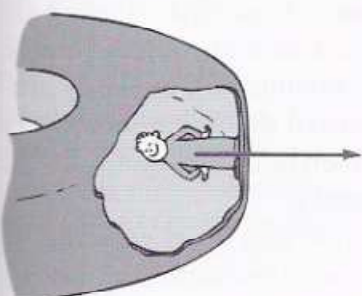
THE Physics Place
Gravedad simulada

COMPRUEBA TU RESPUESTA

El observador en el marco de referencia de la plataforma giratoria afirma que una fuerza centrífuga tira de la bala radialmente hacia afuera, y eso estira el resorte. El observador en el marco de referencia en reposo afirma que una fuerza centrípeta, ejercida por el resorte estirado, tira de la bala y la obliga a describir un círculo junto con la plataforma rotatoria. Sólo el observador en el marco de referencia en reposo puede identificar un par de fuerzas de acción-reacción, donde la acción es el resorte sobre la bala y la reacción es el tirón de la bala hacia afuera sobre el resorte. Sin embargo, el observador rotatorio no puede decir que haya una reacción contraparte a la fuerza centrífuga, ¡porque no hay ninguna!

**FIGURA 8.48**

La interacción entre el hombre y el piso del hábitat vista desde un marco de referencia estacionario, fuera del sistema en rotación. El piso oprime los pies del hombre (acción) y el hombre regresa el empuje al piso (reacción). La única fuerza que se ejerce sobre el hombre se debe al piso. Se dirige hacia el centro y es una fuerza centrípeta.

**FIGURA 8.49**

Visto desde el interior del sistema rotatorio, además de la interacción entre el hombre y el piso hay una fuerza centrífuga sobre el hombre, en su centro de masa. Parece tan real como la gravedad. Sin embargo, a diferencia de la gravedad, no tiene la contraparte de la reacción. No hay nada sobre el que él pueda jalar. La fuerza centrífuga no es parte de una interacción, sino que se debe a la rotación. En consecuencia se llama fuerza aparente o ficticia.

Los seres humanos vivimos en la superficie externa de un planeta esférico, y la gravedad nos sujeta a él. El planeta ha sido la cuna de la humanidad. Pero no permaneceremos por siempre en la cuna. Nos estamos volviendo viajeros en el espacio. En los años venideros muchas personas vivirán, probablemente, en hábitat gigantescos, que giren lentamente en el espacio y a los cuales la fuerza centrífuga mantendrá oprimidos contra las superficies interiores. Los hábitat giratorios brindarán una gravedad simulada, para que el cuerpo humano funcione con normalidad.

Los ocupantes de un trasbordador espacial no tienen peso, ya que *ninguna fuerza los soporta*. No son presionados por la gravedad contra una superficie de apoyo, ni experimentan una fuerza centrífuga debido a la rotación. Durante grandes periodos eso puede causar pérdida de vigor muscular o cambios nocivos en el organismo, por ejemplo, pérdida de calcio en los huesos. Los viajeros del futuro no necesitarán estar sometidos a la ingravidez. Un hábitat espacial rotatorio para los seres humanos, como la rueda giratoria de bicicleta para las catarinas, suministraría con eficacia una fuerza de soporte y simularía muy bien la gravedad. Las estructuras de diámetro pequeño tendrían que girar con gran rapidez para producir una aceleración de gravedad simulada igual a 1 g. En nuestros oídos internos hay órganos sensibles y delicados que detectan la rotación. Aunque parece que no hay dificultad más o menos con una revolución por minuto (RPM), muchas personas encuentran difícil acostumbrarse a mayores rapidezces que 2 o 3 RPM (aunque hay quienes se adaptan con facilidad a unas 10 RPM). Para simular la gravedad normal de la Tierra a 1 RPM se requiere una estructura grande, de más o menos 2 kilómetros de diámetro. Es una estructura inmensa, en comparación con los vehículos espaciales actuales. El tamaño de las primeras estructuras espaciales habitadas ha sido determinado por la economía. La primera estación espacial Mir de Rusia ha dado cabida a algunas personas durante meses, a lo largo de 14 años. La Estación Espacial Internacional tendrá una tripulación mayor, pero como la Mir, no va a girar. Los miembros de la tripulación se deben adaptar a la vida en ambiente de ingravidez. Puede ser que después vengan los hábitat giratorios mayores.

La aceleración centrífuga es directamente proporcional a la distancia radial, por lo que se pueden tener varios estados con g. Si la estructura gira de manera que los habitantes del interior de su periferia sientan 1 g, entonces a la mitad de la distancia hacia el eje sentirían 0.5 g. En el eje mismo sentirían ingravidez (0 g). La diversidad de fracciones de g, desde el perímetro hasta el centro de un hábitat espacial giratorio promete ser un ambiente distinto y (cuando esto se escribe) todavía no explorado. En esta estructura todavía muy hipotética ejecutaríamos un *ballet a* 0.5 g, clavados y acrobacias con 0.2 g y menores; podrían inventarse juegos de fútbol tridimensionales, u otros nuevos deportes, con muy bajos valores de g.

EXAMÍNAME

Si la Tierra girara con más rapidez entorno a su eje, pesarías menos. Si vivieras en un hábitat espacial giratorio que aumentara la rapidez de giro, “pesarías” más. Explica por qué los efectos de los giros más rápidos son opuestas en estos casos.

COMPRUEBA TU RESPUESTA

Estás en el *exterior* de la Tierra que gira, pero en el hábitat espacial giratorio estarías en el *interior*. Un giro más rápido en el exterior de la Tierra tiende a lanzarte *hacia arriba* de la báscula, haciendo que indique una disminución de tu peso; pero es *contra* la báscula que está *dentro* del hábitat espacial, y ésta indicaría un aumento de peso.

FIGURA 8.50

Concepción de un artista que muestra el interior de una colonia espacial futurista, que sería ocupada por unos cuantos miles de personas.



Cantidad de movimiento angular

Las cosas que giran, ya sea una colonia en el espacio, un cilindro que rueda bajando por un plano inclinado o un acróbata que ejecuta un salto mortal, siguen girando hasta que algo las detiene. Un objeto rotatorio tiene una “inercia de rotación”. Recordemos que en el capítulo 6 dijimos que todos los objetos que se mueven tienen “inercia de movimiento”, o *cantidad de movimiento*, que es el producto de su masa por su velocidad. Esta clase de cantidad de movimiento es la *cantidad de movimiento lineal*. De igual manera, la “inercia de rotación” de los objetos que giran se llama *cantidad de movimiento angular*.

Un planeta en órbita en torno al Sol, una piedra que gira en el extremo de una cuerda y los diminutos electrones que giran en torno a los núcleos atómicos tienen cantidad de movimiento angular.

Se define la cantidad de movimiento angular como el producto de la inercia de rotación por la velocidad de rotación.

$\text{Cantidad de movimiento angular} = \text{inercia de rotación} \times \text{velocidad de rotación}$

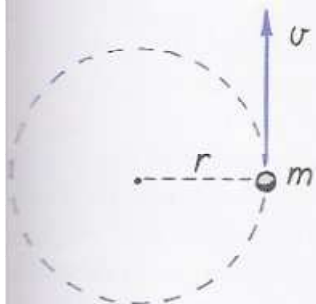
Es la contraparte de la cantidad de movimiento (lineal):

$\text{Cantidad de movimiento} = \text{masa} \times \text{velocidad}$

Al igual que la cantidad de movimiento lineal, la cantidad de movimiento angular es una cantidad vectorial, y tiene tanto dirección como magnitud. En este libro no explicaremos la naturaleza vectorial de la cantidad de movimiento angular (ni del momento de torsión, que también es un vector), pero describiremos la notable acción del giroscopio. La rueda giratoria de bicicleta de la figura 8.51 demuestra lo que sucede cuando un momento de torsión causado por la gravedad de la Tierra actúa tratando de cambiar la dirección de la cantidad de movimiento angular de la rueda (que está a lo largo de su eje). El tirón de la gravedad que normalmente trata de voltear la rueda y cambiar su eje de rotación, hace que su eje *precese* (que se mueva hacia un lado) en una trayectoria circular respecto a un eje vertical. Lo debes hacer tú mismo para acabarlo de creer. Es probable que no lo entiendas totalmente, sino hasta que tomes cursos más avanzados de física.

FIGURA 8.51

La cantidad de movimiento angular mantiene al eje de la rueda casi horizontal, cuando actúa sobre ella un momento de torsión debido a la gravedad terrestre. En vez de hacer que se caiga la rueda, el momento de torsión hace que gire el eje de la rueda, lentamente, recorriendo el círculo de alumnos. A esto se le llama *precesión*.

**FIGURA 8.52**

Un objeto pequeño con masa m que gira en una trayectoria circular de radio r con una rapidez v tiene una cantidad de movimiento angular mvr .

Para el caso de un objeto pequeño en comparación con la distancia radial a su eje de rotación, como cuando una lata gira sujeta de un cordel largo o un planeta está en órbita en torno al Sol, la cantidad de movimiento angular se puede expresar como la magnitud de la cantidad de movimiento lineal, mv , multiplicada por la distancia radial, r (figura 8.52). En notación compacta,

$$\text{Cantidad de movimiento angular} = mvr$$

Así como se requiere una fuerza externa neta para cambiar la cantidad de movimiento lineal de un objeto, se requiere un momento de torsión neto externo para cambiar la cantidad de movimiento angular de un objeto. Ahora enunciaremos una versión de la primera ley de Newton (la ley de la inercia) para la rotación:

Un objeto o sistema de objetos mantiene su cantidad de movimiento angular a menos que sobre ellos actúe un momento de torsión externo neto.

Nuestro Sistema Solar tiene una cantidad de movimiento angular a la que contribuyen el Sol, los planetas que giran sobre su eje y que están en órbita, así como una gran cantidad de pequeños cuerpos. La cantidad de movimiento angular del Sistema Solar en la actualidad será su cantidad de movimiento angular en los eones por venir. Sólo un momento de torsión externo, es decir, fuera del Sistema Solar, podría cambiarlo. En la ausencia de tal momento de torsión, se dice que se conserva la cantidad de movimiento angular del Sistema Solar.

Conservación de la cantidad de movimiento angular

Del mismo modo que la cantidad de movimiento lineal de cualquier sistema se conserva si no hay fuerza neta que actúe sobre él, la cantidad de movimiento angular se conserva si no actúa un momento de torsión neto sobre el sistema. La ley de la conservación de la cantidad de movimiento angular establece:

Si ningún momento de torsión neto externo actúa sobre un sistema en rotación, la cantidad de movimiento angular de ese sistema permanecerá constante.

Esto significa que, si no hay un momento de torsión externo, el producto de la inercia de rotación por la velocidad de rotación en un momento será igual que en cualquier otro momento.

FIGURA 8.53

Figura interactiva

Conservación de la cantidad de movimiento angular. Cuando el hombre junta los brazos a su cuerpo, junto con las pesas giratorias, disminuye su inercia rotacional I y aumenta su rapidez rotacional ω .

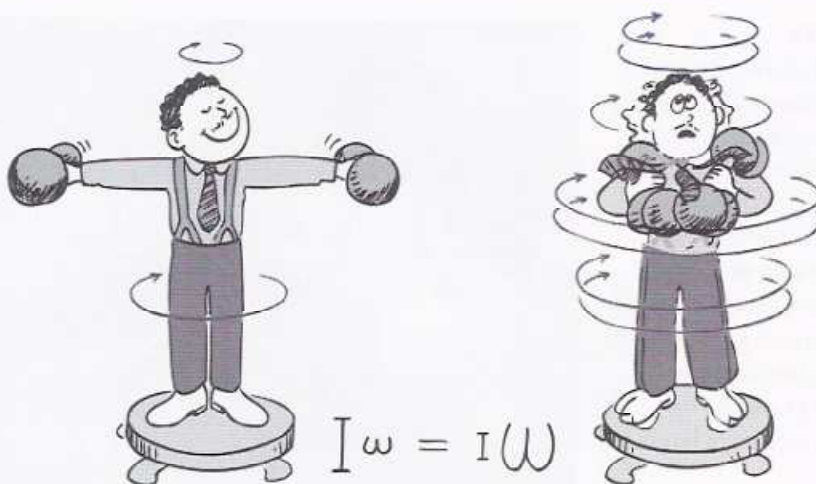


Conservación de la cantidad de movimiento angular
Uso de una plataforma giratoria



¿Por qué los acróbatas de baja estatura tienen ventaja al caer o en otros movimientos de rotación que implican volteretas?

¡EUREKA!



Un ejemplo interesante que ilustra la conservación del momento angular se ve en la figura 8.53. El hombre está de pie sobre una tornamesa con poca fricción, con las pesas extendidas. Su inercia de rotación I , con ayuda de las pesas extendidas, es relativamente grande en esa posición. Cuando gira con lentitud, su momento angular es el producto de su inercia rotacional por la velocidad de rotación, ω . Cuando junta las pesas con su cuerpo, la inercia de rotación de su cuerpo y de las pesas se reduce en forma considerable. ¿Cuál es el resultado? ¡Aumenta su rapidez de rotación! Este ejemplo lo aprecia mejor la persona que gira, que siente cambios de rapidez de rotación que le parecen misteriosos. ¡Pero es física en acción! Este procedimiento lo usan los patinadores artísticos que comienzan a girar con los brazos, y quizá una pierna, extendidos, para después juntar los brazos y la pierna, y así obtener una mayor rapidez de rotación. Siempre que un cuerpo que gira se contrae, aumenta su rapidez de rotación.

Asimismo, cuando un gimnasta gira libremente en ausencia de momento de torsión neto en el cuerpo, no cambia su cantidad de movimiento angular. Sin embargo, puede cambiar su rapidez de rotación tan sólo variando la inercia rotacional. Lo hace moviendo alguna parte del cuerpo acercándola o alejándola del eje de rotación.

Si se sujeta a un gato por sus extremidades y se le deja caer, puede ejecutar un giro y caer parado, aunque no tenga cantidad de movimiento angular inicial. Los giros y las vueltas con cantidad de movimiento angular neto cero se hacen girando una parte del cuerpo contra la otra. Mientras cae, el gato arregla las extremidades y la cola varias veces, para cambiar la inercia de rotación y así cae parado. Durante esta maniobra, la cantidad de movimiento angular total sigue siendo cero (figura 8.55). Cuando el gato termina de caer, lo hace con las extremidades hacia abajo. En esta maniobra gira el cuerpo en determinado ángulo, pero no crea una rotación continua. Si lo hiciera, infringiría la conservación de la cantidad de movimiento angular.

Los seres humanos sin dificultad pueden ejecutar giros parecidos, aunque no tan rápidos como los de un gato. Los astronautas han aprendido a hacer rotaciones con cantidad de movimiento angular cero cuando orientan el cuerpo en determinadas direcciones, flotando libremente en el espacio.

Se percibe la ley de la conservación de la cantidad de movimiento angular en los movimientos de los planetas y las formas de las galaxias. Es fascinante notar que la conservación de la cantidad de movimiento angular nos indica que la Luna se está alejando de la Tierra. Esto se debe a que la rotación diaria de la Tierra disminuye lentamente a causa de la fricción de las aguas con el fondo del mar, de igual manera que las ruedas de un automóvil se desaceleran cuando se aplican los

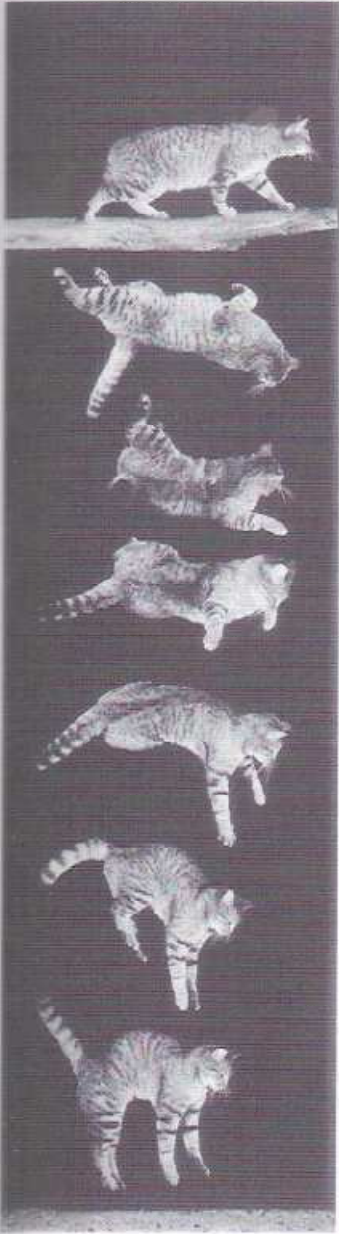


FIGURA 8.55
Fotografía estroboscópica de un gato que cae.

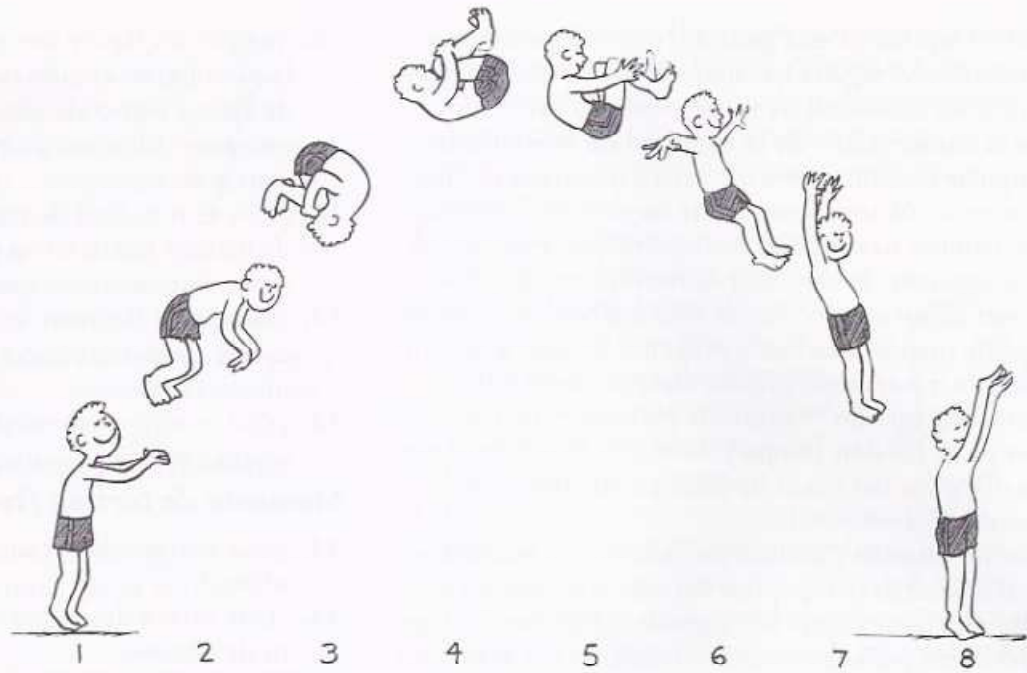


FIGURA 8.54

La rapidez rotacional se controla con variaciones de la inercia rotacional del cuerpo, porque se conserva la cantidad de movimiento angular durante un salto mortal hacia adelante.

frenos. Esta disminución de la cantidad de movimiento angular de la Tierra se acompaña por un aumento igual en la cantidad de movimiento angular de la Luna en su movimiento orbital en torno a la Tierra. Este aumento en la cantidad de movimiento angular de la Luna es la causa del aumento de la distancia a la Tierra y de una disminución de la rapidez tangencial. El aumento de la distancia es más o menos un cuarto de centímetro por rotación. ¿Has notado que últimamente la Luna se está alejando? Sí se aleja; ¡cada vez que vemos otra Luna llena está a un cuarto de centímetro más lejos!

Por cierto, antes de terminar este capítulo contestaremos la pregunta 3 de la página 136 de la sección Examínate. Las tapas de los registros son redondas porque una tapa redonda es la única forma que no se puede caer por el agujero. Por ejemplo, una tapa cuadrada se puede inclinar verticalmente y girar para que caiga diagonalmente en el agujero. Es lo mismo para cualquier otra forma. Si estás trabajando en un registro y algunos muchachos juegan arriba, ¡te alegrarás de que la tapa sea redonda!

Resumen de términos

Cantidad de movimiento angular Producto de la inercia de rotación por la velocidad de rotación respecto a determinado eje. Para un objeto pequeño en comparación con la distancia radial, es el producto de la masa, la rapidez y la distancia radial de rotación.

Centro de gravedad (CG) Posición promedio del peso, o el único punto asociado con un objeto donde se puede considerar que actúa la fuerza de gravedad.

Centro de masa (CM) Posición promedio de la masa de un objeto. El CM se mueve como si todas las fuerzas externas actuaran en este punto.

Equilibrio Estado de un objeto cuando no actúa una fuerza neta ni un momento de torsión neto.

Fuerza centrífuga Fuerza aparente dirigida hacia el exterior que se experimenta en un marco de referencia giratorio. Es ficticia, en el sentido de que no forma parte de una interacción, sino que es un resultado de la rotación y no tiene contraparte en la fuerza de reacción.

Fuerza centrípeta Fuerza dirigida hacia un punto fijo que, por lo general, es la causa del movimiento circular:
 $F = mv^2/r$.

Inercia rotacional Propiedad de un objeto que mide su resistencia a cualquier cambio en su estado de rotación. Si está en reposo, el cuerpo tiende a permane-

cer en reposo; si está girando, tiende a permanecer girando y lo seguirá haciendo a menos que sobre él actúe un momento de torsión externo neto.

Ley de la conservación de la cantidad de movimiento angular Cuando sobre un objeto o sistema de objetos no actúa un momento de torsión neto externo, no cambia su cantidad de movimiento angular. Por consiguiente, la cantidad de movimiento angular antes de un evento, donde sólo intervengan momentos de torsión internos o ninguno, es igual a la cantidad de movimiento angular después del evento.

Momento de torsión = brazo de palanca $\times$ fuerza

Momento de torsión (torque) Producto de la fuerza por la distancia del brazo de palanca que tiende a producir la rotación.

Rapidez de rotación Cantidad de rotaciones o revoluciones por unidad de tiempo; con frecuencia se mide en rotaciones o revoluciones por segundo o por minuto. (Los científicos prefieren medirla en radianes por segundo.)

Rapidez tangencial Rapidez lineal a lo largo de una trayectoria curva, como en el movimiento circular.

Lecturas sugeridas

Brancazio, P. J. *Sport Science*. Nueva York: Simon & Schuster, 1984.

Clarke, A. C. *Rendezvous with Rama*. Nueva York: Harcourt Brace Jovanovich, 1973. Es la primera novela de ciencia ficción en considerar con seriedad la vida humana dentro de una instalación espacial giratoria.

Preguntas de repaso

Movimiento circular

1. ¿Qué quiere decir rapidez tangencial?
2. Explica la diferencia entre rapidez tangencial y rapidez de rotación.
3. ¿Cuál es la relación entre la rapidez tangencial y la distancia desde el centro del eje de rotación? Menciona un ejemplo.
4. Un cono que rueda por una superficie plana describe una trayectoria circular. ¿Qué te dice eso acerca de la rapidez tangencial en la orilla de la base del cono, en comparación con la de la punta?
5. ¿Cómo permite la forma cónica de una rueda de ferrocarril que una parte de ella tenga mayor rapidez tangencial que otra, cuando rueda sobre la vía?

Inercia rotacional

6. ¿Qué es la inercia rotacional y cómo se compara con la inercia que estudiaste en los capítulos anteriores?
7. La inercia depende de la masa. La inercia rotacional depende de la masa y de algo más. ¿De qué?
8. ¿Es distinta la inercia rotacional de un objeto, respecto a distintos ejes de rotación? ¿Un objeto puede tener más de una inercia rotacional?

9. Imagina un lápiz y tres ejes de rotación: a lo largo de la puntilla; en ángulo recto con el lápiz y a la mitad de éste; y perpendicular al lápiz y en uno de los extremos. Clasifica de menor a mayor en cuanto a la inercia de rotación.

10. ¿Qué es más fácil de poner en movimiento, un bat de béisbol sujeto en su extremo, o uno sujeto más cerca de su extremo masivo?
11. ¿Por qué el flexionar las piernas cuando corres te ayuda a moverlas hacia adelante y hacia atrás con mayor rapidez?
12. ¿Qué tendrá mayor aceleración al rodar bajando de un plano inclinado, un aro o un disco macizo?

Momento de torsión (torque)

13. ¿Qué tiende a hacer un momento de torsión a un objeto?
14. ¿Qué quiere decir "brazo de palanca" de un momento de torsión?
15. Cuando un sistema está en equilibrio, ¿cómo se comparan los momentos de torsión sobre él, en sentido de las manecillas del reloj y en sentido contrario al de las manecillas del reloj?

Centro de masa y centro de gravedad

16. Lanza un lápiz al aire y parecerá cabecear en todos sus puntos. Pero en forma específica, ¿respecto a qué punto?
17. ¿Dónde está el centro de masa de una pelota de béisbol? ¿Dónde está su centro de gravedad? ¿Dónde están esos centros en un bat de béisbol?

Ubicación del centro de gravedad

18. Si con las manos cuelgas en reposo de una cuerda vertical, ¿dónde está tu centro de gravedad con respecto a la cuerda?
19. ¿Dónde está el centro de masa de un balón de fútbol sóquer?

Estabilidad

20. ¿Cuál es la relación entre el centro de gravedad y la base de un objeto, para que éste se encuentre en equilibrio estable?
21. ¿Por qué no se desploma la Torre Inclinada de Pisa?
22. En términos de centro de gravedad, base de soporte y momento de torsión, ¿por qué no te puedes parar con los talones contra la pared, flexionarte hasta tocarte los dedos de los pies y, después, regresar a la posición de pie?

Fuerza centrípeta

23. Cuando giras una lata amarrada con una cuerda, para que describa una trayectoria circular, ¿cuál es la dirección de la fuerza que se ejerce sobre la lata?
24. Cuando una lavadora automática exprime la ropa, ¿se ejerce sobre ésta una fuerza hacia adentro o hacia afuera?

Fuerza centrífuga

25. Si se rompe el cordel que sujeta una lata en giro circular, ¿qué clase de fuerza hace que se mueva describiendo una trayectoria rectilínea? ¿Una fuerza centrípeta, una centrífuga o ninguna fuerza? ¿Qué ley de la física respalda tu respuesta?
26. Si vas en un automóvil que toma una curva y no te abrochas el cinturón de seguridad, te deslizarás sobre el asiento y vas a dar contra la portezuela. ¿Qué clase de fuerza es la responsable de que vayas a dar contra la portezuela? ¿Centrípeta, centrífuga o ninguna? Respalda tu respuesta.

Fuerza centrífuga en un marco de referencia rotatorio

27. ¿Por qué se dice que la fuerza centrífuga en un marco de referencia rotatorio es una "fuerza ficticia"?

Gravedad simulada

28. ¿Cómo se puede simular la gravedad en una estación espacial en órbita?

Cantidad de movimiento angular

29. Describe la diferencia entre cantidad de movimiento lineal y angular.
30. ¿Cuál es la ley de la inercia para los sistemas rotatorios, en función de la cantidad de movimiento angular?

Conservación de la cantidad de movimiento angular

31. ¿Qué quiere decir que se conserva la cantidad de movimiento angular?
32. Si un patinador que gira acerca los brazos para reducir su inercia rotacional a la mitad, ¿cuánto aumentará su cantidad de movimiento angular? ¿Cuánto aumentará la rapidez de los giros? (¿Por qué son distintas tus respuestas?)

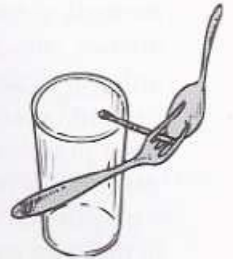
Proyectos

1. Escribe una carta a tu abuelito y cuéntale cómo estás aprendiendo a distinguir entre conceptos estrechamente relacionados, utilizando los ejemplos de fuerza y momento de torsión. Explícale en qué se parecen y en qué difieren. Sugiere dónde puede encontrar objetos prácticos en casa que ilustren la diferencia entre los dos conceptos. También cita un ejemplo que muestre cómo la fuerza neta de un objeto puede ser cero, mientras que el momento de torsión neto no lo es, así como un ejemplo que demuestre lo contrario. (Ahora, ¡envía la carta a tu abuelito!)
2. Sujeta un par de vasos desechables por sus extremos anchos y ruédalos a lo largo de un par de reglas largas que simulen vías férreas. Observa

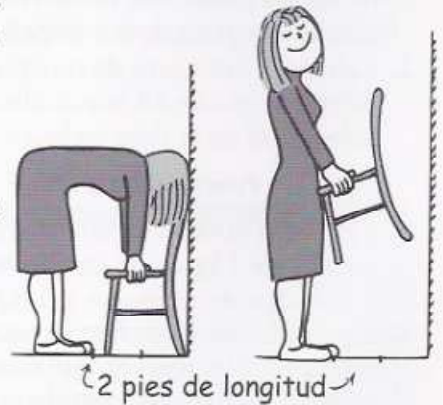


cómo se corrigen ellos mismos siempre que su trayectoria se aleja del centro. Pregunta: si pegaras los vasos en sus bases, de modo que su conicidad fuera opuesta, ¿corregirían ellos mismos su dirección o se autodestruirían si rodaran un poco descentrados?

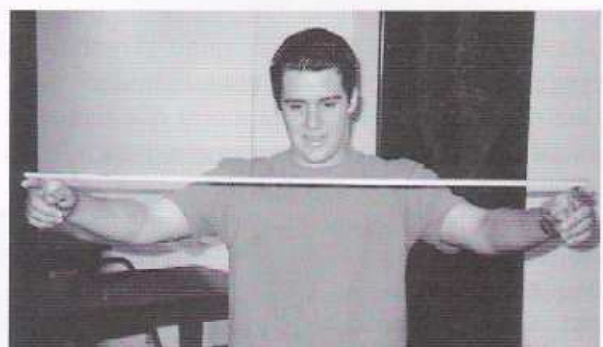
3. Sujeta un tenedor, una cuchara y un cerillo de madera como se ve en la figura. La combinación se equilibrará muy bien, en el borde de un vaso, por ejemplo. Esto sucede porque en realidad el centro de gravedad "cuelga" bajo el punto de apoyo.



4. Párate con los talones apoyándolos contra una pared y trata de flexionarte hasta tocarte los dedos de los pies. Verás que tienes que pararte a cierta distancia de la pared para hacerlo sin caerte. Compara la distancia mínima de los talones a la pared, con la de un amigo o amiga. ¿Quién se puede tocarse los dedos de los pies



5. Píde a un amigo que se pare de cara a una pared, con los dedos de los pies junto a la pared, y pídele que se pare de puntas sin caerse. No lo podrá hacer. Explícale exactamente por qué no lo puede hacer.
6. Coloca una regla de un metro en los dos índices extendidos, como se ve en la figura. Acerca lentamente los dedos. ¿En qué parte de la regla se encuentran? ¿Puedes explicar por qué siempre sucede así, independientemente de dónde tenías los dedos al principio?



7. Da vueltas rápidas a una cubeta con agua, en un círculo vertical formado al extender los brazos, y verás que el agua no se derrama. ¿Por qué?
8. Coloca el gancho de un colgador de ropa en tu dedo. Con cuidado coloca horizontalmente una moneda sobre el alambre recto inferior, directamente bajo el gancho. Tendrás que aplastar el alambre con un martillo, o hacerle una pequeña plataforma con una cinta adherible. Con poca práctica sorprendentemente podrás oscilar el gancho y la moneda en equilibrio, primero en vaivén y después en círculo. La fuerza centrípeta mantiene la moneda en su lugar.



Cálculos de un paso

Momento de torsión = Brazo de palanca $\times$ Fuerza

1. Calcula el momento de torsión que produce una fuerza perpendicular de 50 N en el extremo de una llave inglesa de 0.2 m de largo.
2. Calcula el momento de torsión que produce la misma fuerza de 50 N cuando un tubo extiende la longitud de la llave inglesa a 0.5 m.

Fuerza centrípeta: $F = mv^2/r$

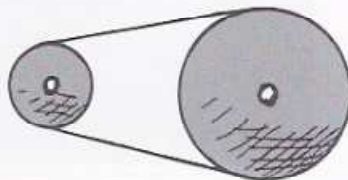
3. Calcula la tensión en una cuerda que hace girar un juguete de 2 kg en un círculo horizontal de radio de 2.5 m cuando se mueve a 3 m/s.
4. Calcula la fuerza de fricción que mantiene a una persona de 75 kg sentada en la orilla de una plataforma giratoria horizontal, cuando la persona se encuentra a 2 m del centro de la plataforma y tiene una rapidez tangencial de 3 m/s.

Cantidad de movimiento angular = mvr

5. Calcula la cantidad de movimiento angular de la persona en el problema anterior.
6. Si la rapidez de la persona se duplica y todo lo demás permanece igual, ¿cuál será la cantidad de movimiento angular de la persona?

Ejercicios

1. Cuando se rebobina una cinta de audio o de video, uno de los carretes gira más rápido al final. ¿Cuál es este carrete y por qué aumenta su rapidez?
2. Una rueda grande se acopla a otra que tiene la mitad de su diámetro, como se observa en la figura. ¿Cómo se comparan la rapidez rotacional de la rueda pequeña y la grande? ¿Cómo se comparan las rapidezces



tangenciales en sus orillas (suponiendo que la banda no se deslice)?

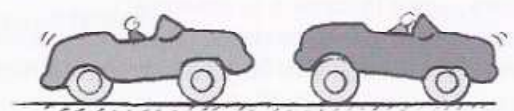
3. El velocímetro de un automóvil está configurado para indicar una rapidez proporcional a la rapidez de rotación de las ruedas. Si se usan ruedas más grandes, por ejemplo cuando se instalan ruedas para la nieve, ¿el velocímetro indicará rapidez mayor, menor, o no indicará algo distinto?
4. Dany y Susy van en bicicleta con la misma rapidez. Los neumáticos de la bicicleta de Dany tienen mayor diámetro que los de Susy. ¿Cuáles ruedas tienen mayor rapidez de rotación, si es que la tienen?
5. Las ruedas de los ferrocarriles son cónicas, propiedad que tiene una importancia especial en las curvas. ¿Cómo se relaciona, si es que se relaciona, la cantidad de conicidad con la curvatura de las vías?
6. Utiliza la ecuación $v = r\omega$ para explicar por qué el extremo de un matamoscas se mueve más rápido que tu muñeca cuando intentas matar una mosca.
7. Con frecuencia se ve a los flamings parados en una sola pata y con la otra levantada. ¿Qué puedes decir acerca del centro de masa de estas aves con respecto a la extremidad en la cual se posan?
8. En este capítulo aprendimos que un objeto *no* debe estar en equilibrio mecánico incluso cuando $\Sigma F = 0$. Explica por qué.
9. Las ruedas delanteras de un auto de arrancones, que están al frente muy lejos del piloto, ayudan a evitar que el auto suba la nariz al acelerar. ¿Qué conceptos de la física intervienen aquí?



10. Cuando un automóvil cae por un acantilado, ¿por qué gira hacia adelante al caer? (Ten en cuenta el momento de torsión que actúa sobre él al dejar el borde del acantilado.)



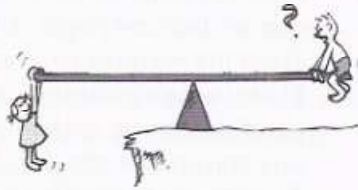
11. ¿Por qué un automóvil sube la nariz al acelerar y la baja cuando frena?



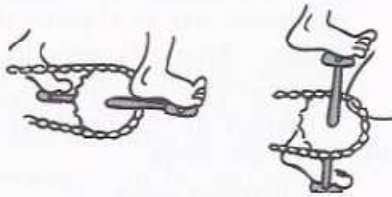
12. ¿Qué tiene más aceleración al rodar de bajada por un plano inclinado, una bola de bolos o un balón de voleibol? Sustenta tu respuesta.

13. Una pelota de softbol y una de baloncesto inician a rodar desde el reposo en un plano inclinado.Cuál llegará primero al punto final. Justifique su respuesta.
14. Usando una rampa, ¿cómo podrías distinguir, entre dos esferas de apariencia idéntica y del mismo peso, cuál es maciza y cuál está hueca?
15. ¿Qué rodará con mayor rapidez por un plano inclinado, un bote lleno de agua o uno lleno de hielo?
16. ¿Por qué son preferibles los neumáticos ligeros sobre armazones ligeros en las bicicletas de carreras?
17. Un joven que se inscribió en una competencia (en la cual vehículos de cuatro ruedas sin potencia ruedan desde el reposo cuesta abajo) pregunta si deben usarse ruedas grandes y masivas, o ligeras. Además, ¿las ruedas deben tener rayos o ser sólidas? ¿Qué le aconsejarías?

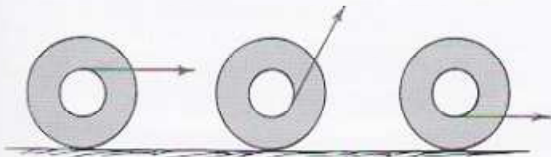
18. ¿Cambia el momento de torsión neto cuando uno de los niños del sube y baja se para o se cuelga de él, en vez de estar sentado? (¿Cambia el peso o el brazo de palanca?)



19. Cuando pedaleas una bicicleta, el momento de torsión máximo se produce cuando los pedales están en posición horizontal, como se ve en la figura, y no se produce momento de torsión cuando están en posición vertical. Explica por qué.



20. ¿Es posible que una fuerza produzca un momento de torsión cuando no hay brazo de palanca?
21. Cuando la línea de acción de una fuerza intercepta el centro de masa de un objeto, ¿la fuerza produce un momento de torsión alrededor del centro de masa del objeto?
22. El carrito de la figura es jalado de tres modos, como se ve abajo. Hay la fricción suficiente para que gire. ¿En qué dirección girará ese carrito, en cada uno de los casos?



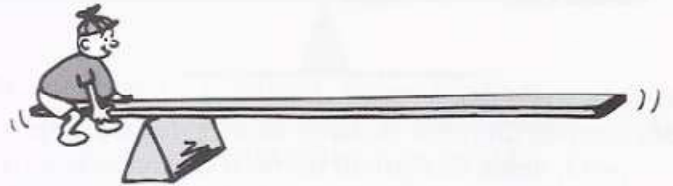
23. Cuando una bola de boliche sale de la mano del jugador, no gira. Pero más adelante, a lo largo de la pista, sí gira. ¿Qué produce la rotación?
24. ¿Por qué los asientos centrales de un autobús son los más cómodos en viajes largos, cuando la carreta es irregular? ¿O por qué el centro de un barco es

más cómodo cuando el mar está picado? ¿O en el centro de un avión al encontrar turbulencias?

25. ¿Qué es más difícil: hacer abdominales con las rodillas dobladas o con las piernas estiradas? ¿Por qué?
26. Explica por qué es mejor que se flexione hacia abajo la pértiga larga de un equilibrista.



27. ¿Por qué si una estrella muestra un movimiento errático se toma como indicio de que tiene uno o más planetas en órbita en torno a ella?
28. ¿Por qué te debes doblar hacia adelante cuando cargas algo pesado en la espalda?
29. ¿Por qué es más fácil cargar igual cantidad de agua en dos cubetas, una en cada mano, que en una sola cubeta?
30. Nadie en el parque de diversiones quiere jugar con el niño latoso, porque desarregla el sube y baja como se ve en la figura, para poder jugar él solo. Explica cómo lo hace.

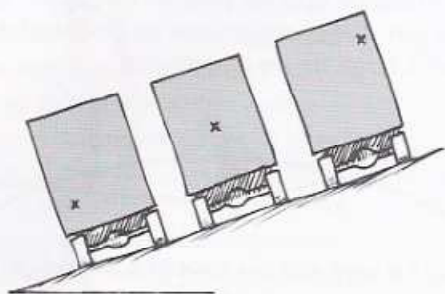


31. Aplica los conceptos de momento de torsión y centro de gravedad para explicar por qué una pelota rueda cuesta abajo por una colina.
32. ¿Cómo se pueden apilar tres ladrillos de modo que el de arriba tenga un desplazamiento horizontal máximo respecto al de abajo? Por ejemplo, si los apilas como indican las líneas de puntos, parece que quedarían inestables y que se caerían. (Sugerencia: comienza con el ladrillo de arriba y avanza hacia abajo. En cada cambio de ladrillo, el CG de los de arriba no debe sobresalir del extremo del ladrillo que los soporta.)

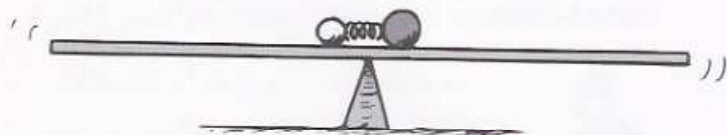


33. ¿Dónde está el centro de masa de la atmósfera de la Tierra?
34. ¿Por qué es importante asegurar al piso los archivadores, especialmente cuando los cajones superiores están totalmente llenos?
35. Describe las estabilidades comparativas de los tres objetos de la figura 8.36, página 144, en términos de trabajo y energía potencial.

36. Los centros de gravedad de los tres camiones estacionados en una pendiente se indican con las X. ¿Cuál(es) camión(es) se volteará(n)?

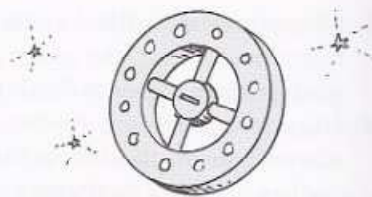


37. Una pista larga, equilibrada como un sube y baja, sostiene a una pelota de golf y a una bola de billar, con más masa, y un resorte comprimido entre las dos. Cuando se suelta el resorte, la pelota y la bola se alejan entre sí. ¿La pista se mueve en sentido de las manecillas del reloj, en sentido contrario al de las manecillas del reloj, o permanece en equilibrio al rodar las bolas hacia afuera? ¿Qué principios aplicas en tu explicación?



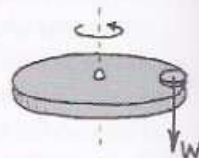
38. Cuando un cañón de largo alcance dispara un proyectil, desde una latitud norte (o sur) hacia el ecuador, el proyectil cae al oeste del blanco. ¿Por qué? (Sugerencia: imagina una pulga que salta del interior de un disco fonográfico hacia el borde.)
39. Un automóvil de carreras en una pista plana y circular necesita fricción entre los neumáticos y la pista para mantener su movimiento circular. ¿Cuánta más fricción se requiere al duplicar la rapidez?
40. ¿Es posible que un objeto se mueva a lo largo de un camino curvado si ninguna fuerza actúa sobre él?
41. Cuando estás en el asiento delantero de un automóvil que toma una vuelta a la izquierda podrías ser empujado contra la portezuela derecha. ¿Por qué te recargas contra ella? ¿Por qué la portezuela se recarga contra ti? En tu explicación, ¿interviene una fuerza centrífuga o las leyes de Newton?
42. La fricción es necesaria para que un automóvil tome una curva. Pero, si el camino está peraltado, la fricción resulta innecesaria. Entonces, ¿qué es lo que aporta la fuerza centrípeta necesaria?
43. Conforme un automóvil acelera cuando toma una curva, ¿la aceleración centrípeta también aumenta? Utiliza una ecuación para fundamentar tu respuesta.
44. Explica por qué una fuerza centrípeta *no* trabaja sobre un objeto que se mueve circularmente.
45. ¿En qué condiciones podría permanecer un automóvil en una pista peraltada y cubierta con hielo resbaloso?

46. Una persona en el interior del hábitat rotatorio del futuro, siente que la gravedad artificial tira de ella hacia la pared

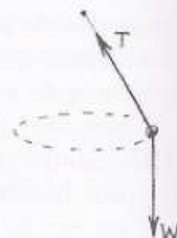


perimetral del hábitat (que viene a ser el "piso"). Explica lo que sucede en términos de las leyes de Newton y de la fuerza centrípeta.

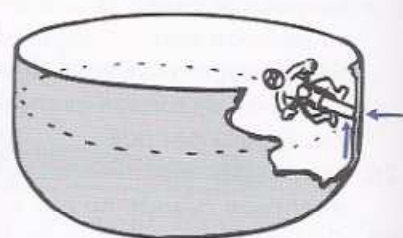
47. El esquema muestra una moneda al borde de una tornamesa. El peso de la moneda se indica con el vector W . Sobre la moneda actúan dos fuerzas más, la fuerza normal y la de fricción, que evita que se deslice y salga de la orilla. Traza los vectores de esas dos fuerzas.



48. El esquema siguiente muestra un péndulo cónico. La lenteja describe una trayectoria circular. La tensión T y el peso W se indican con vectores. Traza un paralelogramo con esos vectores y demuestra que su resultante está en el plano del círculo. (Repasa la regla del paralelogramo en el capítulo 5.) ¿Cuál es el nombre de esa fuerza resultante?



49. Un motociclista puede correr sobre la pared vertical de una pista que tiene forma de tazón, como se ve en la figura. La fricción de la pared sobre los neumáticos se indica con la flecha vertical. a) ¿Cómo se compara la magnitud de este vector vertical con el peso de la motocicleta y el conductor? b) ¿El vector horizontal representa la fuerza normal que actúa sobre la motocicleta y el conductor, la fuerza centrípeta, las dos o ninguna? Justifique su respuesta.



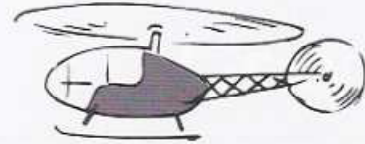
50. Una canica rueda en trayectoria circular, sobre la superficie interna de un cono. El peso de la canica se representa con el vector W . Si no hay fricción, sólo hay otra fuerza más que actúa sobre la canica; es una fuerza normal. a) Traza el vector de la fuerza normal (su longitud depende de b). b) Con la regla del paralelogramo, demuestra que la resultante de dos vectores está a lo largo de la dirección radial de la trayectoria circular de la canica. (¡Sí, la normal es mucho más grande que el peso!)



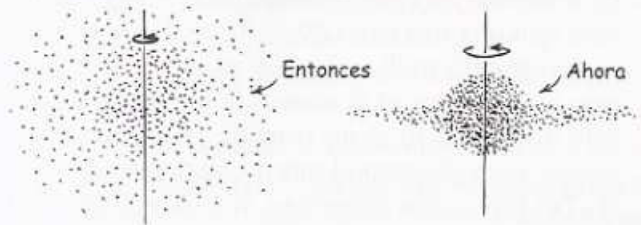
51. Estás sentado a la mitad de una gran tornamesa en un parque de diversiones, cuando se pone a girar, y después se deja girar libremente. Cuando te arrastras a la orilla, ¿aumenta su rapidez de rotación, o disminuye o queda igual? ¿Qué principio de la física respalda tu respuesta?
52. Una cantidad apreciable de suelo que arrastra el río Mississippi se deposita cada año en el Golfo de México. ¿Qué efecto tiene a lo largo de un día? (Sugerencia: relaciona esto con la figura 8.53, página 152.)
53. Estrictamente hablando, a medida que se construyen cada vez más rascacielos en la superficie de la Tierra, ¿el día tiende a acortarse o a alargarse? Y hablando al detalle, ¿la caída otoñal de las hojas tiende a alargar o a acortar los días? ¿Qué principio físico respalda tus respuestas?
54. Si los habitantes del mundo se mudaran a los polos norte y sur, ¿qué efecto tendría en la duración del día (sería mayor, menor o igual)?
56. Si los casquetes polares de la Tierra se fundieran, los océanos serían alrededor de 30 metros más profundos. ¿Qué efecto tendría esto sobre la rotación de la Tierra?
57. Un tren de juguete está inicialmente en reposo en una vía fijada a una rueda de bicicleta, que puede girar libremente. ¿Cómo responde la rueda cuando el tren se mueve en el sentido de las manecillas del reloj? ¿Y cuando el tren va en reversa? ¿Cambia la cantidad de movimiento angular del sistema rueda-tren durante esas maniobras? ¿Cómo dependerían los movimientos resultantes de las masas relativas de la rueda y del tren?



58. ¿Por qué un helicóptero pequeño normal tiene una hélice principal grande y un segundo rotor pequeño en la cola? Describe las consecuencias si falla el segundo rotor durante el vuelo.



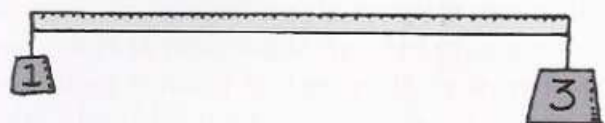
59. Creemos que nuestra galaxia se formó a partir de una nube gigantesca de gas. Esta nube era mucho más grande que el tamaño actual de la galaxia, era más o menos esférica, y giraba con mucho más lentitud que la que gira ahora. En este esquema vemos la nube original y la galaxia tal como es hoy (vista de lado). Explica cómo contribuyen la ley de la gravitación y la de la conservación de la cantidad de movimiento angular a que la galaxia tenga su forma actual, y por qué gira hoy con más rapidez que cuando era una nube mayor y esférica.



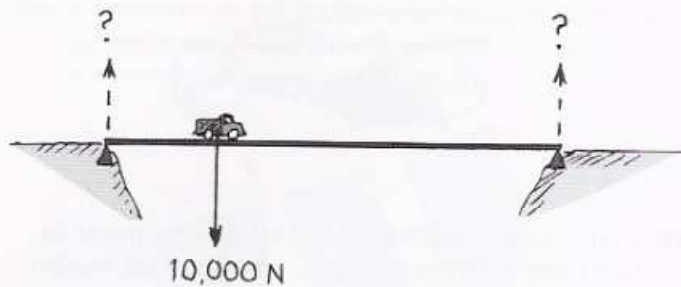
60. La Tierra no es esférica, sino ensanchada en el ecuador. Júpiter tiene un mayor ensanchamiento. ¿Cuál es la causa de estos ensanchamientos?

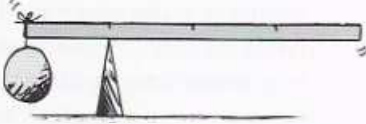
Problemas

1. Una bicicleta tiene ruedas de 2 m de circunferencia. ¿Cuál es la rapidez lineal de la bicicleta cuando las ruedas giran a 1 revolución por segundo?
2. ¿Cuál es la rapidez tangencial de un pasajero en una rueda de la fortuna cuyo radio es 10 m y da una vuelta cada 30 segundos?
3. Sin tener en cuenta el peso de la regla de un metro y sólo las dos pesas que cuelgan de los extremos: una de 1 kg y la otra de 3 kg, tal como se muestra, ¿dónde queda el centro de masa de este sistema (el punto de equilibrio)? ¿Cuál es la relación de tu respuesta con el momento de torsión?

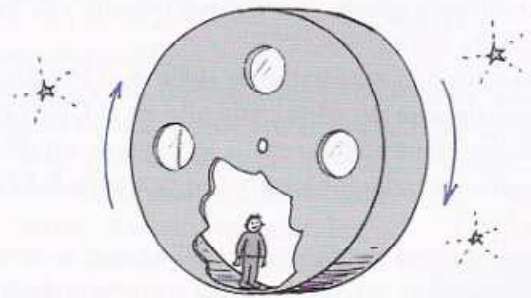


4. Un vehículo de 10,000 N se detiene a la cuarta parte de su trayecto por un puente. Calcula las fuerzas de reacción adicionales que suministran los soportes situados en ambos extremos del puente.



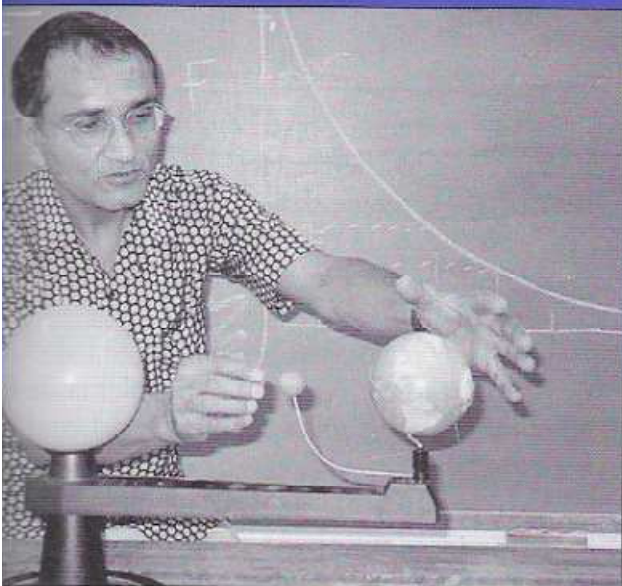
5. La piedra tiene 1 kg de masa. ¿Cuál es la masa de la regla si queda en equilibrio al sostenerla en la cuarta parte de su longitud?
- 
6. Para apretar un tornillo, empujas el mango de la llave con una fuerza de 80 N. Tu mano queda a 0.25 m del eje del tornillo. a) ¿Cuál es el momento de torsión que ejerces? b) Si acercas la mano para que sólo quede a 0.10 m del tornillo, ¿qué fuerza debes aplicar para alcanzar el mismo momento de torsión? c) ¿Tus respuestas dependen de la dirección de tu empuje en relación con la dirección del mango de la llave?
 7. Considera un hábitat demasiado pequeño que forma un cilindro giratorio de 4 m de radio. Si un

hombre se para en su interior, y tiene 2 m de estatura, y sus pies sienten 1 g, ¿cuál es el valor de g al nivel de la cabeza? (¿Ves por qué en los proyectos se piden hábitat grandes?)



8. Si la variación de g entre la cabeza y los pies de una persona debe ser menor que $1/100 g$, entonces, en comparación con la estatura de una persona, ¿cuál debe ser el radio mínimo del hábitat espacial?
9. Si un trapecista gira una vez por segundo mientras va por el aire, y se encoge para reducir su inercia rotacional hasta un tercio, ¿cuántas rotaciones por segundo dará?
10. ¿Cuántas veces es mayor la cantidad de movimiento angular de la Tierra en órbita en torno al Sol que el de la Luna en órbita alrededor de la Tierra? (Determina una relación de las cantidades de movimiento angulares con los datos que vienen en los forros de este libro.)

Gravedad



Para explicar las mareas vivas y las mareas muertas, Praful Shah usa un modelo del Sol, la Luna y la Tierra.

THE Physics Place
Gravedad

Newton no descubrió la gravedad, pues ese descubrimiento se remonta hasta los orígenes de la humanidad, cuando los primeros pobladores constataron las consecuencias de tropezarse y luego caer. Lo que Newton descubrió fue que la gravedad es universal y que no es un fenómeno exclusivo de la Tierra, como lo habían considerado sus predecesores.

Desde tiempos de Aristóteles se veía como natural el movimiento circular de los cuerpos celestes. Los pensadores de la Antigüedad creían que las estrellas, los planetas y la Luna se mueven en círculos divinos, libres de cualquier fuerza impulsora. En lo que a ellos concierne, el movimiento circular no requería explicación. Sin embargo, Isaac Newton reconoció que sobre los planetas debe actuar una fuerza de cierto tipo; sabía que sus órbitas eran elipses, o de lo contrario serían líneas rectas. Otras personas de su tiempo, influidas por Aristóteles, suponían que cualquier fuerza sobre un planeta debería estar dirigida a lo largo de una trayectoria. Sin embargo, Newton se dio cuenta de que la fuerza sobre cada planeta estaría dirigida hacia un punto central fijo: hacia el Sol. Ésta, la fuerza de gravedad, era la misma que tira una manzana de un árbol. El golpe de inspiración de Newton, que la fuerza entre la Tierra y una manzana es la misma fuerza que tira de las lunas, de los planetas y de todo lo que hay en el Universo, fue una ruptura revolucionaria con la noción prevaleciente de que había dos conjuntos de leyes naturales: una para los objetos en la Tierra y otra, muy distinta, para el movimiento en los cielos. A esta unión de leyes terrestres y leyes cósmicas se le llama síntesis newtoniana.

La ley universal de la gravedad

Según una leyenda popular, Newton estaba sentado bajo un manzano cuando concibió la idea de que la gravedad se propaga más allá de la Tierra. Quizá levantó la vista por entre las ramas del árbol, hasta observar la caída de una manzana y vio la Luna. En cualquier caso, tuvo la perspicacia de apreciar que la fuerza entre la Tierra y una manzana que cae es la misma que tira de la Luna y la obliga a describir una trayectoria orbital en torno a la Tierra; dicha trayectoria es parecida a la de un planeta que gira alrededor del Sol.

Para probar esta hipótesis, Newton comparó la caída de una manzana con la “caída” de la Luna. Se dio cuenta de que la Luna cae en el sentido de que *se aleja de la línea recta que hubiera seguido de no haber una fuerza que actuara sobre ella*. A causa de su velocidad tangencial, “cae alrededor” de la Tierra redonda (en el siguiente capítulo explicaremos más acerca de esto). A partir de consideraciones geométricas sencillas, podía comparar la distancia que la Luna cae en un

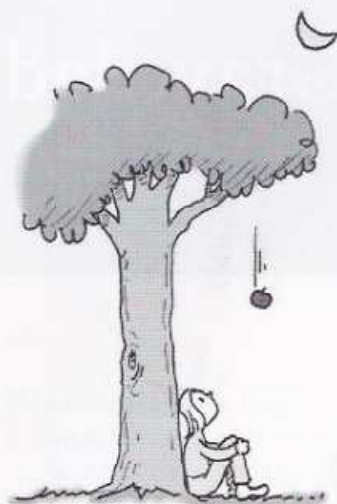


FIGURA 9.1

¿Podría llegar hasta la Luna la atracción para jalar una manzana?



Así como la partitura guía al músico para interpretar, las ecuaciones guían al estudiante de física para entender cómo se relacionan los conceptos.

¡EUREKA!

segundo con la distancia que una manzana, o cualquier objeto que estuviera a esa distancia, debería caer en un segundo. Los cálculos de Newton no coincidieron. Algo afligido, pero convencido de que el hecho evidente debe ser más convincente que la hipótesis más bella, guardó sus papeles en un cajón, donde permanecieron durante casi 20 años. Durante ese periodo, fundó y desarrolló el campo de la óptica geométrica, que fue con lo que primero se hizo famoso.

El interés de Newton por la mecánica fue reavivado por la llegada de un espectacular cometa en 1680 y otro dos años después. Retornó al problema de la Luna, a instancias de Edmund Halley, su amigo astrónomo, en honor del cual el segundo cometa recibió su nombre. Newton hizo correcciones de los datos experimentales que usó en su primer método y obtuvo excelentes resultados. Sólo entonces publicó lo que es una de las generalizaciones más trascendentes de la inteligencia humana: la ley de la gravitación universal.¹

Todo atrae a lo demás en una forma bella y simple, donde sólo intervienen masa y distancia. Según Newton, todo cuerpo atrae a todos los demás cuerpos con una fuerza que, para dos cuerpos cualesquiera, es directamente proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. Lo anterior se expresa como

$$\text{Fuerza} \sim \frac{\text{masa}_1 \times \text{masa}_2}{\text{distancia}^2}$$

o, en forma simbólica,

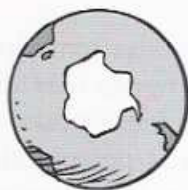
$$F \sim \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

donde m_1 y m_2 son las masas de los cuerpos y d es la distancia entre sus centros. Así, cuanto mayores sean las masas m_1 y m_2 , será mayor la fuerza de atracción entre ellas. Cuanto mayor sea la distancia de separación d , la fuerza de atracción será más débil, en proporción inversa al cuadrado de la distancia entre sus centros de masa.²



FIGURA 9.2

La velocidad tangencial de la Luna en torno a Tierra le permite caer alrededor de la Tierra, y no directamente hacia ella. Si esa velocidad tangencial se redujera a cero, ¿cuál sería el destino de la Luna?



¹ Es un ejemplo notable del penoso esfuerzo y comprobaciones cruzadas que intervienen en la formulación de una teoría científica. Ve la diferencia entre el método de Newton y “no hacer la tarea”, los juicios apresurados y la carencia de comprobación que caracterizan con tanta frecuencia los pronunciamientos de individuos que fomentan teorías seudocientíficas.

² Observa en este caso el papel distinto de la masa. Hasta ahora hemos considerado que la masa es una medida de la inercia, y que se llama *masa inercial*. Ahora vemos que la masa es una medida de la fuerza gravitacional, y en este contexto se llama *masa gravitacional*. Se ha establecido experimentalmente que las dos son iguales y, por principio, la equivalencia de las masas inercial y gravitacional es el fundamento en la teoría general de Einstein sobre la relatividad.

EXAMÍNATE

1. En la figura 9.2 se observa que la Luna cae girando en torno a la Tierra, en vez de hacerlo directo hacia ella. Si su velocidad tangencial fuera cero, ¿cómo se movería la Luna entonces?
2. Según la ecuación de la fuerza gravitacional, ¿qué sucede con la fuerza entre dos cuerpos, si se duplica la masa de uno de ellos? ¿Y si se duplican ambas masas?
3. La fuerza gravitacional actúa sobre todos los cuerpos, en proporción con sus masas. Entonces, ¿por qué un cuerpo pesado no cae más rápido que uno ligero?

La constante G de la gravitación universal

Así como π relaciona la circunferencia y el diámetro en el caso de los círculos, G relaciona la fuerza gravitacional con la masa y la distancia.

¡EUREKA!

La forma de proporcionalidad de la ley de la gravitación universal se puede expresar como igualdad, cuando se introduce la constante de proporcionalidad G , que se llama *constante universal de la gravitación*. Entonces la ecuación es

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

En palabras, la fuerza de la gravedad entre dos objetos se calcula multiplicando sus masas y dividiendo el producto entre el cuadrado de la distancia entre sus centros, y luego multiplicando este resultado por la constante G . La magnitud de G es igual a la magnitud de la fuerza entre dos masas de 1 kilogramo que están a 1 metro de distancia entre sí: es 0.0000000000667 N, que es una fuerza extremadamente débil. En unidades estándar y en notación científica,³

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$$

Henry Cavendish, físico inglés, midió G por primera vez, en el siglo XVIII, mucho después de los días de Newton. Lo hizo midiendo la diminuta fuerza entre masas de plomo, con una balanza de torsión extremadamente sensible. Después, Philipp von Jolly desarrolló un método más sencillo, al fijar un frasco esférico con mercurio a un brazo de una balanza sensible (figura 9.4). Después de poner en equilibrio la balanza, rodó una esfera de plomo de 6 toneladas bajo el frasco de



COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Si la velocidad tangencial de la Luna fuera cero, ¡caería directo hacia abajo y chocaría contra la Tierra!
2. Cuando una masa aumenta al doble, la fuerza entre ella y la otra también aumenta al doble. Si las dos masas aumentan al doble, la fuerza será cuatro veces mayor.
3. La respuesta viene del capítulo 4. Recuerda la figura 4.11, donde los ladrillos pesados y ligeros caen con la misma aceleración, porque ambos tienen la misma relación de peso entre masa. La segunda ley de Newton ($a = F/m$) nos recuerda que mayor fuerza sobre mayor masa no produce mayor aceleración.



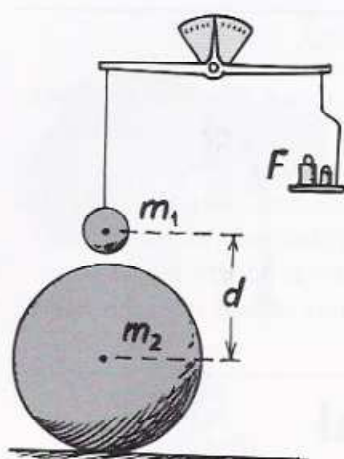
FIGURA 9.3

Conforme un cohete se aleja de la Tierra, disminuye la fuerza gravitacional entre este y nuestro planeta.

³ El valor numérico de G depende por completo de las unidades de medida que se elijan para masa, distancia y tiempo. En el sistema internacional se eligen: para masa, el kilogramo; para la distancia, el metro; y para el tiempo, el segundo. La notación científica se describe en el apéndice I al final del libro.

Es interesante que Newton pudiera calcular el producto de G por la masa de la Tierra, pero no cualquiera de las dos magnitudes. Henry Cavendish hizo el cálculo de G solo por primera vez.

Debido a la debilidad relativa de la gravedad, G es la constante fundamental que se conoce con menos exactitud en toda la física. Aun así, actualmente se le conoce con cinco cifras significativas de exactitud.

**FIGURA 9.4**

Método que usó Jolly para medir G . Las esferas de masa m_1 y m_2 se atraen entre sí con una fuerza F igual a los pesos necesarios para restaurar el equilibrio.



Método de Von Jolly para medir la atracción entre dos masas



¡Nunca podemos cambiar sólo una cosa! Cada ecuación nos recuerda esto: es imposible cambiar un término en un lado sin afectar el otro.

¡EUREKA!

mercurio. La fuerza gravitacional entre las dos masas era igual al peso que se había colocado en el platillo opuesto de la balanza para restaurar el equilibrio. Se conocían todas las cantidades m_1 , m_2 , F y d , y con ellas se calculó la cantidad G :

$$G = \frac{F}{\left(\frac{m_1 m_2}{d^2}\right)} = 6.67 \times 10^{-11} \frac{\text{N}}{\text{kg}^2/\text{m}^2} = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$$

El valor de G nos indica que la fuerza de gravedad es muy débil. Es la más débil de las cuatro fuerzas fundamentales que se conocen hasta ahora. (Las otras tres son la fuerza electromagnética y dos clases de fuerzas nucleares.) Sentimos la gravitación sólo cuando intervienen masas gigantescas, como la de la Tierra. La fuerza de atracción entre tú y un trasatlántico, junto al cual te pares, es demasiado débil para realizar una medición ordinaria. Sin embargo, sí se puede medir la fuerza de atracción entre tú y la Tierra. Es tu peso.

Tu peso depende no sólo de tu masa sino también de tu distancia al centro de la tierra. En la cúspide de una montaña, tu masa es la misma que en cualquier otro lugar, aunque tu peso sería ligeramente menor que a nivel del suelo. Es así porque tu distancia al centro de la Tierra es mayor.

Una vez conocido el valor de G se calculó con facilidad la masa de la Tierra. La fuerza que ejerce la Tierra sobre una masa de 1 kilogramo en su superficie es de 9.8 Newton. La distancia entre los centros de masa del cuerpo de 1 kilogramo y la Tierra es el radio de la Tierra, 6.4×10^6 metros. En consecuencia, a partir de $F = G(m_1 m_2 / d^2)$, donde m_1 es la masa de la Tierra,

$$9.8 \text{ N} = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2 \frac{1 \text{ kg} \times m_1}{(6.4 \times 10^6 \text{ m})^2}$$

de aquí se calcula que la masa de la Tierra es $m_1 = 6 \times 10^{24}$ kilogramos.

En el siglo XVIII, la gente de todo el mundo se emocionó cuando se midió G por primera vez. Los periódicos anunciaron el experimento como el que logró medir la masa del planeta Tierra. La estupenda fórmula de Newton da la masa de todo el planeta, incluyendo océanos, montañas y partes del subsuelo aun por descubrirse. G y la masa de la Tierra se midieron cuando una gran proporción de la superficie de la tierra era aún desconocida.

EXAMÍNATE

Si hay fuerza de atracción entre todos los objetos, ¿por qué no nos sentimos gravitando hacia los edificios masivos de las cercanías?

COMPRUEBA TU RESPUESTA

La gravedad sí tira de nosotros hacia los edificios masivos, y hacia todo lo demás que hay en el Universo. Paul A. M. Dirac, físico ganador del Premio Nobel en 1933, lo expresó de la siguiente forma: "¡Corta una flor en la Tierra y moverás la estrella más lejana!" El grado de influencia que tienen los edificios sobre nosotros, o cuánta interacción hay entre las flores y las estrellas ya es otra historia. Las fuerzas entre nosotros y los edificios son extremadamente pequeñas, porque sus masas son muy pequeñas en comparación con la masa de la Tierra. Las fuerzas debidas a las estrellas son pequeñas debido a sus grandes distancias. Estas fuerzas diminutas escapan a nuestra percepción porque son ocultadas por la inmensa atracción hacia la Tierra.

Gravedad y distancia: la ley del inverso del cuadrado

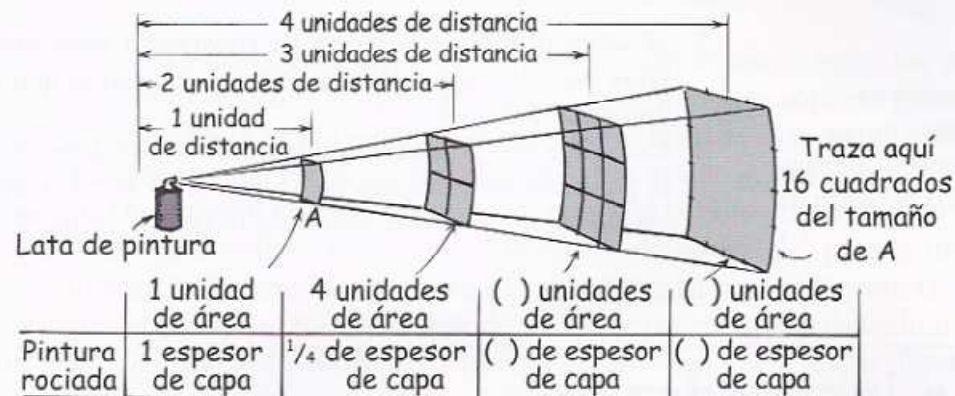


Ley del inverso del cuadrado

Comprenderemos mejor cómo se diluye la gravedad en la distancia, si imaginamos una lata de aerosol que lanza pintura y la reparte al aumentar la distancia (figura 9.5). Supongamos que colocamos la lata en el centro de una esfera de 1 metro de radio, y que una aspersión viaja 1 metro y produce una mancha cuadrada de pintura, cuyo espesor es de 1 milímetro. ¿Cuánto tendría de espesor si el experimento se hubiera hecho en una esfera con el doble del radio? Si la misma cantidad de pintura viaja 2 metros en línea recta, se repartirá y producirá una mancha con el doble de altura y el doble del ancho. La pintura se repartiría sobre un área cuatro veces mayor, y su espesor tan sólo sería de 1/4 de milímetro.

FIGURA 9.5

La ley del inverso del cuadrado. La pintura esparcida viaja en dirección radial alejándose de la boquilla del aerosol, en línea recta. Al igual que la gravedad, la "intensidad" de la rociada obedece la ley del inverso del cuadrado.



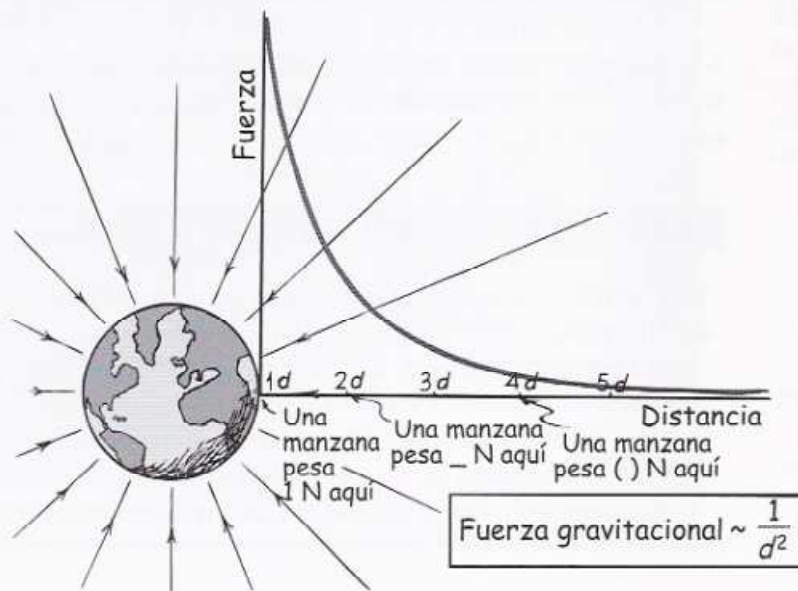
¿Puedes ver que, de acuerdo con la figura, en una esfera de 3 metros de radio, el espesor de la mancha de pintura sólo sería de 1/9 de milímetro? ¿Puedes ver que cuando la distancia aumenta, el espesor de la pintura disminuye de acuerdo con el cuadrado de esa distancia? A esto se le llama **ley del inverso del cuadrado**. Es válida para la gravedad y para todos los fenómenos en donde el efecto de una fuente localizada se reparte uniformemente en el espacio que la rodea, como el campo eléctrico que rodea a un electrón aislado, la luz de un fósforo, la radiación de un trozo de uranio y el canto de un grillo.

Es importante destacar que el término de distancia d en la ecuación de la gravedad de Newton es la distancia entre los centros de las masas de los objetos. Observa, en la figura 9.6, que la manzana que pesaría normalmente 1 newton en la superficie de la Tierra sólo pesa 1/4 cuando se encuentra al doble de la distan-

FIGURA 9.6

Figura interactiva

Si una manzana pesa 1 N en la superficie terrestre, sólo pesaría 1/4 N al doble de la distancia al centro de la Tierra. Al triple de la distancia sólo pesaría 1/9 N. En la imagen se aprecia la fuerza de gravedad en función de la distancia. ¿Cuánto pesaría la manzana a cuatro veces la distancia? ¿Y a cinco veces?



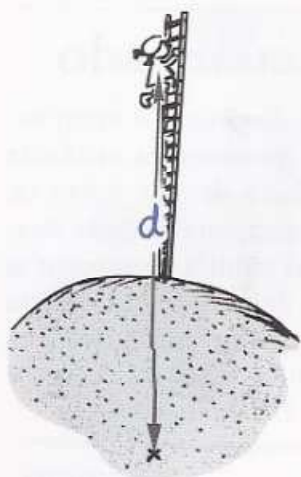


FIGURA 9.7

Según la ecuación de Newton, su peso (no su masa) disminuye al aumentar su distancia al centro de la Tierra.

cia al centro de la Tierra. Cuanto mayor sea la distancia al centro de la Tierra, será menor el peso del objeto. Un niño que pese 300 newtons al nivel del mar sólo pesará 299 newtons en la cumbre del Monte Everest. A mayores distancias, habrá menores fuerzas. Para distancias muy grandes, la fuerza de gravedad de la Tierra *tiende* a cero, pero nunca será igual a cero. Incluso si te transportas hasta los confines del universo, todavía estarás bajo la acción gravitacional de tu hogar; aunque ésta quedaría “opacada” si se compara con las influencias gravitacionales de cuerpos más cercanos y/o más masivos, pero seguiría existiendo. La influencia gravitacional de todo objeto material, sin importar su pequeñez o su lejanía, se extiende por todo el espacio.

EXAMÍNA TE

1. ¿Cuánto disminuye la fuerza de gravitación entre dos objetos cuando la distancia entre sus centros aumenta al doble? ¿Y cuando aumenta al triple? ¿Y cuando aumenta diez veces?
2. Considera una manzana que está en la punta de un árbol y que es atraída por la gravedad terrestre con una fuerza de 1 N. Si el árbol fuera dos veces más alto, ¿la fuerza de gravedad sólo sería la cuarta parte? Sustenta tu respuesta.

Peso e ingravidez

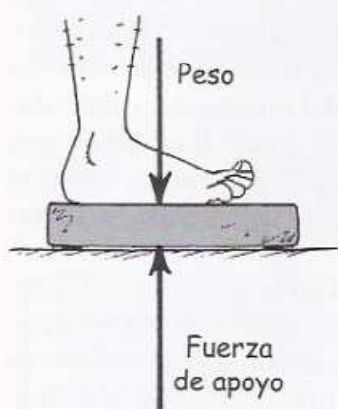


FIGURA 9.8

Cuando te pones de pie sobre una báscula, dos fuerzas actúan sobre esta última: una fuerza de gravedad hacia abajo (tu peso ordinario, mg , si no hay aceleración) y una fuerza de soporte hacia arriba. Estas fuerzas iguales y opuestas ejercen presión sobre un dispositivo similar a un resorte que existe dentro de la báscula y que está calibrado para indicar el peso.

Cuando te paras sobre una báscula, comprimes un resorte que hay en su interior. Cuando se detiene la aguja, la fuerza elástica del resorte deformado equilibra la atracción gravitacional entre tú y la Tierra; nada se mueve porque tú y la báscula están en equilibrio estático. La aguja se calibra para indicar tu peso. Si te subes a una báscula dentro de un elevador en movimiento, verás que tu peso varía. Si el elevador acelera hacia arriba, los resortes dentro de la báscula se comprimen más, y la indicación de tu peso será mayor. Si el elevador acelera hacia abajo, los resortes del interior de la báscula se comprimen menos y la indicación de tu peso disminuirá. Si el cable del elevador se rompe, y éste cae libremente, la indicación de la báscula baja a cero. Según lo que indica la báscula **no tendrías peso (ingravidez)** ¿Realmente no tendrías peso? Podemos contestar esta pregunta sólo si nos ponemos de acuerdo en el significado de la palabra *peso*.

En los capítulos 2 y 4 definimos el peso de un objeto como la fuerza debida a la gravedad sobre dicho objeto. Cuando está en equilibrio sobre una superficie sólida, el peso se manifiesta con la presencia de la fuerza de soporte o, cuando está suspendido, con la tensión de una cuerda de soporte. En cualquier caso, sin

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Disminuye a la cuarta parte, a la novena parte y a la centésima parte.
2. No, porque el manzano con el doble de altura no está al doble de la distancia al centro de la Tierra. El árbol debería crecer hasta que su altura fuera igual al radio de la Tierra (6,370 km) para que el peso de la manzana fuera de $1/4$ N. Para que su peso baje 1%, una manzana, o cualquier objeto, debe subir 32 km, casi cuatro veces la altura del Monte Everest. Entonces, para fines prácticos, no se tienen en cuenta los efectos de los cambios cotidianos de la elevación.

**FIGURA 9.9**

Tu peso es igual a la fuerza con que comprimes el suelo que te sostiene. Si el suelo acelera hacia arriba o hacia abajo, tu peso varía (aunque la fuerza gravitacional mg que actúa sobre ti permanezca invariable).

THE Physics Place
Ingravedad aparente

THE Physics Place
Peso e ingravedad

aceleración el peso equivale a mg . Entonces, cuando analizamos los ambientes giratorios en el capítulo 8, aprendimos que una fuerza de soporte puede presentarse sin considerar la gravedad. Así que una definición más amplia del peso de algo es la fuerza que ejerce contra el piso sobre el que se encuentra o sobre una báscula. De acuerdo con esta definición, eres tan pesado como te sientes; así, en un elevador que acelera hacia abajo, la fuerza de apoyo del piso es menor y tú pesas menos. Si el elevador estuviera en caída libre, tu peso sería cero (figura 9.9). Sin embargo, aun en esta condición de no tener peso, sigue habiendo una fuerza gravitacional que obra sobre ti y causa tu aceleración hacia abajo. Pero ahora la gravedad no se siente como peso, porque no hay fuerza de soporte.

Un astronauta en órbita no tiene peso porque no lo sostiene algo. En ocasiones los astronautas sufren el “mal del espacio”, hasta que se acostumbran a el estado de ingravedad continua. Cuando están en órbita experimentan un estado de caída libre continua.

La Estación Espacial Internacional de la figura 9.11 proporciona un ambiente sin peso. Ésta y los astronautas aceleran por igual hacia la Tierra, a algo menos

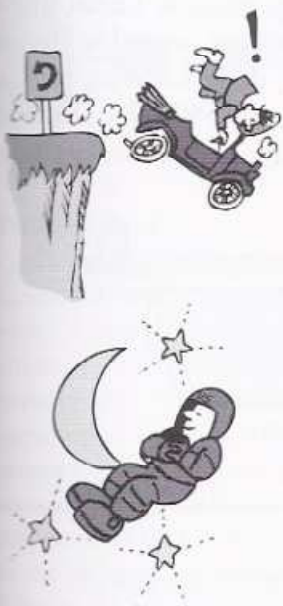
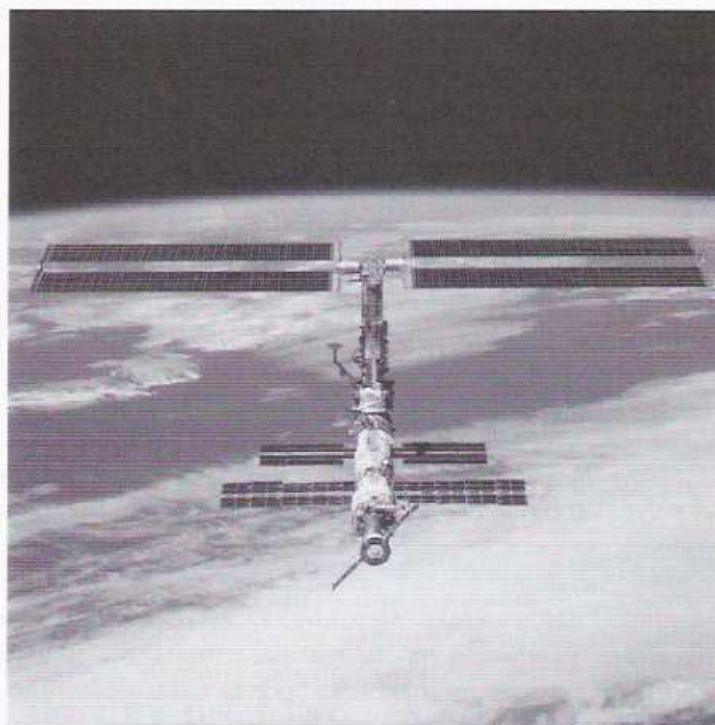


FIGURA 9.10
Ambos no tienen peso.

**FIGURA 9.11**

Los habitantes de esta instalación de laboratorio y puerto experimentan ingravedad continua. Están en caída libre en torno a la Tierra. ¿Actúa sobre ellos alguna fuerza de gravedad?



Los astronautas dentro de una nave espacial en órbita no tienen peso, aunque la fuerza de gravedad entre ellos y la Tierra es apenas ligeramente menor que la que se experimenta a nivel del suelo.

¡EUREKA!

que 1 g, debido a su altitud. Esta aceleración para nada se siente; con respecto a la estación, los astronautas sienten cero g.

Por largos periodos, esto ocasiona pérdida de la fuerza muscular y otros cambios nocivos para el cuerpo. Sin embargo, los futuros viajeros del espacio necesitan no estar sometidos a condiciones de ingravidez. Como se mencionó en el capítulo anterior, es probable que enormes ruedas giratorias o cápsulas en los extremos de un cable tomen el lugar de las estaciones espaciales actuales que no giran. Efectivamente la rotación suministra una fuerza de soporte y un peso.

EXAMÍNAME

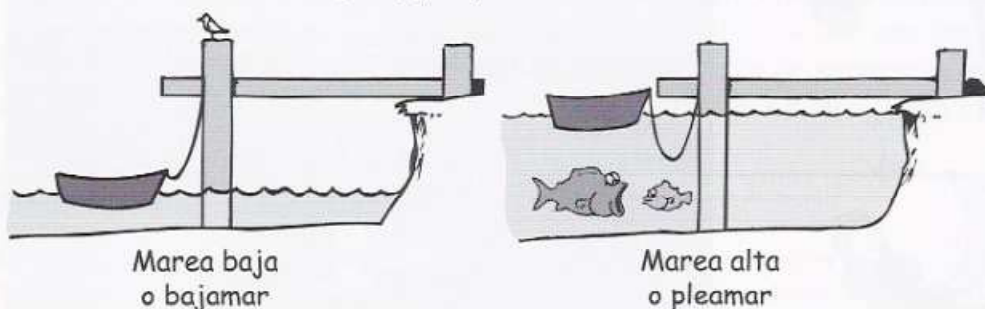
¿En qué se parece andar a la deriva en el espacio alejado de todos los cuerpos celestes, a caerse de una escalera de tijera?

Mareas

Los marinos siempre supieron que hay una relación entre las mareas y la Luna; sin embargo, nadie pudo ofrecer una teoría satisfactoria que explicara las dos pleamares diarias. Newton demostró que las mareas son causadas por *diferencias* en los tirones gravitacionales entre la Luna y la Tierra, en los lados opuestos de la Tierra. La fuerza gravitacional entre la Luna y la Tierra es mayor en la cara de la Tierra más cercana a la Luna, y es menor en la cara de la Tierra alejada de la Luna. Tan sólo se debe a que la fuerza gravitacional es más débil cuando la distancia es mayor.

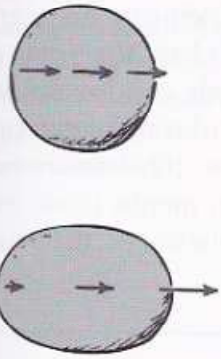
Para entender por qué la diferencia en los tirones gravitacionales de la Luna en los lados opuestos de la Tierra es lo que produce las mareas, imagina que tienes una gran pelota de gelatina. Si ejerces la misma fuerza en cada parte de ella, permanecerá esférica cuando acelere. Pero si tiras más de un lado que de otro, habría una diferencia en las aceleraciones y la pelota se alargaría (figura 9.13). Es lo que le sucede a esta gran pelota sobre la que vivimos. El lado más cercano a la Luna es tirado con mayor fuerza, y tiene mayor aceleración hacia la Luna, que el lado lejano, por lo que la Tierra adquiere una forma parecida a un balón de fútbol americano. Pero, ¿la Tierra acelera hacia la Luna? Sí, debe hacerlo, porque sobre ella actúa una fuerza, y donde hay una fuerza neta hay aceleración. Se trata de una aceleración *centrípeta*, porque la Tierra describe círculos en torno al cen-

FIGURA 9.12
Mareas oceánicas.

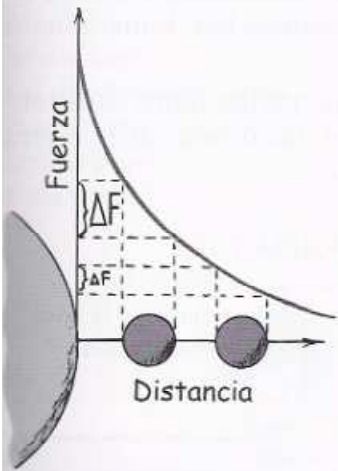


COMPRUEBA TU RESPUESTA

En ambos casos sientes ingravidez. Al estar flotando en el espacio conservas la ingravidez, porque no hay fuerza que actúe sobre ti. Si te caes de la escalera tendrías ingravidez momentánea, por la falta momentánea de una fuerza de soporte.

**FIGURA 9.13**

Una esfera de gelatina permanece esférica cuando se tira de todas sus partes por igual en la misma dirección. Sin embargo, cuando uno de sus lados es atraído más que el otro, su forma se alarga.

**FIGURA 9.15**

Gráfica de la gravedad en función de la distancia (no está a escala). Cuanto mayor sea la distancia al Sol, la fuerza F será menor, porque varía según $1/d^2$; y la diferencia entre atracciones gravitacionales en los lados opuestos de un planeta, ΔF , es menor, porque varía en función de $1/d^3$ y, en consecuencia, las mareas serán menores.

tro de masa del sistema Tierra-Luna (un punto en el interior de la Tierra, más o menos a las tres cuartas partes desde el centro hasta la superficie). Tanto la Tierra como la Luna sufren una aceleración centrípeta cuando describen su órbita en torno al centro de masa de la Tierra y la Luna. Esto hace que tanto la Tierra como la Luna se alarguen un poco. El alargamiento de la Tierra se ve principalmente en los océanos, que se abultan por igual en ambos lados.

En promedio mundial, los abultamientos del mar son casi de 1 metro sobre su nivel normal. La Tierra gira una vez cada día, por lo que un punto fijo en la Tierra pasa bajo los dos abultamientos una vez al día. Eso produce dos conjuntos de mareas por día. Cualquier parte de la Tierra que pase bajo uno de los abultamientos tiene marea alta, o pleamar. Cuando la Tierra ha dado un cuarto de vuelta, 6 horas después, el nivel del agua en la misma parte del océano está casi a 1 m abajo del nivel promedio del mar. A esto se le llama marea baja o bajamar. El agua que "no está" está bajo los abultamientos que forma los pleamares. Cuando la Tierra da otro cuarto de vuelta se produce un segundo abultamiento de marea. Es así que tenemos dos pleamares y dos bajamares cada día. Sucede que mientras gira la Tierra, la Luna avanza en su órbita y aparece en la misma posición del cielo cada 24 horas y 50 minutos, por lo que el ciclo de dos pleamares en realidad es en intervalos de 24 horas y 50 minutos. Es la causa de que las mareas no se produzcan a la misma hora todos los días.

**FIGURA 9.14**

Dos abultamientos de marea permanecen relativamente fijos con respecto a la Luna, cuando la Tierra gira diariamente bajo ellos.

También el Sol contribuye con las mareas, aunque con menos de la mitad de la eficacia que la Luna, aun cuando su tirón sobre la Tierra es 180 veces mayor que el de la Luna. ¿Por qué el Sol no causa mareas 180 veces mayores que las de la luna? La respuesta tiene que ver con una palabra clave: *diferencia*. Debido a la gran distancia al Sol, la diferencia de sus tirones gravitacionales en las caras opuestas de la Tierra es muy pequeña (figura 9.15). El porcentaje de diferencia de los tirones solares sólo es aproximadamente 0.017%, en comparación con el 6.7% debido a la Luna. Sólo porque el tirón del Sol es 180 veces mayor que el de la Luna, las mareas solares tienen casi la mitad de la altura ($180 \times 0.017\% = 3\%$, casi la mitad del 6.7 %).

Newton dedujo que la diferencia entre los tirones disminuye de acuerdo con el *cuadrado* de la distancia entre los centros de los cuerpos: dos veces más lejos produce $1/4$ de la marea; tres veces más lejos, sólo $1/9$ de la marea, y así sucesivamente. Sólo las distancias relativamente cortas producen mareas apreciables, por lo que nuestra cercana Luna le gana al Sol, mucho más masivo pero más alejado. La cantidad de marea también depende del tamaño del cuerpo que tienen las mareas. Aunque la Luna produce una marea considerable en los océanos de la Tierra, que están a miles de kilómetros de distancia, casi no produce nada en un



FIGURA 9.16

La diferencia entre fuerzas de marea debidas a un cuerpo de 1 kg a una altura de 1 m sobre la cabeza de una persona promedio es de cerca de unas 60 billonésimas (6×10^{-11}) de N/kg. Cuando la Luna está arriba de uno, es aproximadamente 0.3 billonésimas (3×10^{-13}) de N/kg. En consecuencia, ¡un melón arriba de tu cabeza produce unas 200 veces más mareas en tu cuerpo que la Luna!

lago. Eso se debe a que ninguna parte del lago está apreciablemente más cercana a la Luna, que cualquier otra parte del mismo lago, y así no hay *diferencia* apreciable entre los tirones de la Luna sobre el lago. Igual sucede con los fluidos de tu cuerpo. Todas las mareas causadas por la Luna en los fluidos de tu cuerpo son ínfimas. No tenemos estatura suficiente para tener mareas. ¡Qué micromareas puede producir la Luna en tu organismo, si sólo son más o menos cinco milésimas de las mareas que produce un melón de 1 kilogramo puesta a 1 metro sobre tu cabeza (figura 9.16)!

EXAMÍNA TE

Sabemos que tanto la Luna como el Sol producen nuestras mareas. También sabemos que la Luna tiene un papel más importante, porque está más cerca. ¿Esa cercanía significa que tira de los océanos terrestres con mayor fuerza gravitacional que el Sol?

Cuando se alinean el Sol, la Tierra y la Luna, las mareas causadas por el Sol y la Luna coinciden. Entonces tenemos pleamares más altas que lo normal, y bajamares más bajas que lo normal. A éstas las llamamos **mareas vivas** (figura 9.17) o mareas de primavera (aunque no tienen nada que ver con la estación primaveral). Puedes afirmar que están alineados el Sol, la Tierra y la Luna, cuando es Luna llena o en la Luna nueva. Cuando es Luna llena, la Tierra está entre el Sol y la Luna (si los tres estuvieran alineados *exactamente* habría un eclipse lunar, porque la Luna llena estaría dentro de la sombra de la Tierra). Una Luna nueva sucede cuando la Luna está entre el Sol y la Tierra, y el lado oscuro de la Luna ve hacia la Tierra. (Cuando este alineamiento es perfecto, la Luna tapa al Sol y se tiene un eclipse solar.) Las mareas vivas se presentan cuando hay Luna llena o Luna nueva.

No todas las mareas vivas tienen igual altura, porque varían tanto la distancia entre la Tierra y la Luna como entre la Tierra y el Sol; las órbitas de la Tierra y de la Luna en realidad no son circulares, sino elípticas.

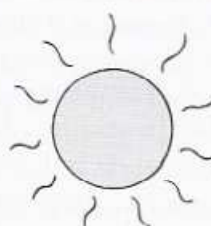


FIGURA 9.17

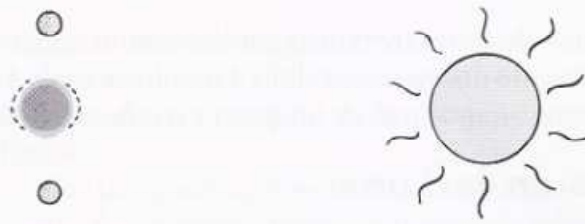
Cuando se alinean las atracciones del Sol y la Luna, suceden las mareas vivas.

COMPRUEBA TU RESPUESTA

No, la atracción del Sol es mucho más intensa. El tirón gravitacional se debilita en función del cuadrado de la distancia al cuerpo que atrae. No obstante, la *diferencia* entre las atracciones sobre los océanos terrestres se debilita en función de la distancia elevada al cubo. Cuando la distancia al Sol se eleva al cuadrado, la gravitación del Sol sigue siendo mayor que la gravitación de la Luna, que está cerca, debido a la enorme masa del Sol. Pero cuando la distancia al Sol se eleva al cubo, como en el caso de las fuerzas de marea, la influencia del Sol es menor que la de la Luna. La diferencia de distancias es la clave de las fuerzas de marea. Si la Luna estuviera más cerca de la Tierra, las mareas en la Tierra y en la Luna aumentarían de acuerdo con la disminución en la distancia elevada al cubo. Si se acerca demasiado, la Luna podría rasgarse catastróficamente en pedazos, como parecen indicar los anillos de Saturno y de otros planetas.

FIGURA 9.18

Cuando las atracciones del Sol y la Luna forman un ángulo de 90° , hay media Luna y se producen las mareas muertas.

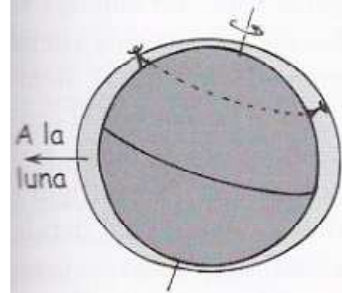


La distancia de la Tierra a la Luna varía más o menos 10%, y el efecto sobre el nivel de las mareas varía en aproximadamente 30%. Las mareas vivas más altas suceden cuando la Luna y el Sol están más próximos a la Tierra.

Cuando la Luna está a mitad del camino entre una Luna nueva y una Luna llena, en cualquier dirección (figura 9.18), las mareas debidas al Sol y a la Luna se anulan parcialmente entre sí. Entonces, las mareas altas son más bajas que el promedio, y las mareas bajas no son tan bajas como el promedio de mareas bajas. Se trata de las **mareas muertas**.

Otro factor que afecta a las mareas es la inclinación del eje terrestre (figura 9.19). Aunque los abultamientos opuestos de las mareas son iguales, la inclinación de la Tierra causa que las dos mareas altas diarias que ocurren en la mayoría del océano sean desiguales la mayor parte del tiempo.

Nuestra explicación de las mareas aparece aquí bastante simplificada. Por ejemplo, las masas de los continentes y la fricción con el fondo del mar complican los movimientos en las mareas. En muchos lugares, las mareas se dividen en "cuencas de circulación" más pequeñas, donde una elevación de marea se mueve como una onda que circula por una pequeña cuenca con la inclinación adecuada. Por tal razón, la pleamar puede ocurrir a varias horas de distancia de la Luna en el cenit. A la mitad del océano, la variación en el nivel del agua, el intervalo de marea, suele ser de más o menos 1 metro. Este intervalo varía en distintas partes del mundo. Es máximo en algunos fiordos de Alaska, y es muy favorable en la cuenca de la Bahía de Fundy, entre New Brunswick y Nueva Escocia, en el este de Canadá, donde a veces las diferencias de niveles son mayores de 15 metros. Esto se debe principalmente al fondo del mar, que forma una especie de embudo dirigido hacia la costa. Con frecuencia, la marea llega con mayor velocidad de la que puede tener una persona al correr. ¡No busques caracoles cerca de la costa con marea baja en la Bahía de Fundy!

**FIGURA 9.19**

Desigualdad de dos mareas vivas en un día. Por la inclinación de la Tierra, una persona en el hemisferio norte podrá decir que la marea más cercana a la Luna es mucho más baja (o más alta), que la que ocurre medio día después. Las desigualdades de las mareas varían de acuerdo con las posiciones de la Luna y el Sol.



Además de las mareas oceánicas, la Luna y el Sol provocan mareas atmosféricas, que suben y luego bajan durante La luna llena. ¿Esto explica por qué algunos de tus amigos se comportan de manera extraña cuando hay luna llena?

¡EUREKA!

Mareas en la Tierra y en la atmósfera

La Tierra no es un sólido rígido sino, en su mayor parte, es un líquido cubierto por una costra delgada, sólida y flexible. En consecuencia, las fuerzas de marea debidas a la Luna y al Sol provocan mareas en tierra, al igual que en el océano. Dos veces por día ¡la superficie sólida terrestre sube y baja 25 centímetros! En consecuencia, los terremotos y las erupciones volcánicas tienen una probabilidad un poco mayor de suceder, cuando la Tierra está en una marea viva terrestre; esto es, cerca de una Luna nueva o de una Luna llena.

Vivimos en el fondo de un océano de aire que también sufre mareas. Como estamos en el fondo de la atmósfera no las notamos (al igual que un pez de las profundidades no se da cuenta de las mareas en los océanos). En la parte alta de la atmósfera está la ionosfera, que se llama así porque contiene muchos iones, átomos con carga eléctrica debidos a la luz ultravioleta y al intenso bombardeo de los rayos cósmicos. Los efectos de la marea en la ionosfera generan corrientes eléctricas que modifican el campo magnético que envuelve la Tierra. Son las mareas magnéticas. A la vez, esas mareas regulan el nivel de penetración de los rayos cósmicos en la atmósfera inferior. La penetración de los rayos cósmicos se evidencia en cambios sutiles en los comportamientos de los entes vivientes. Las



FIGURA 9.20

La atracción de la Tierra sobre la Luna, en su centro de gravedad, produce un momento de torsión en el centro de masa de la Luna, que tiende a hacer girar el eje largo de la Luna para alinearse con el campo gravitacional de la Tierra (como una brújula que se alinea con el campo magnético). ¡Es la causa de que sólo una cara de la Luna vea hacia la Tierra!

altas y bajas de las mareas magnéticas son máximas cuando la atmósfera tiene mareas vivas, de nuevo, cerca de la Luna nueva y la Luna llena. ¿Has notado que alguno de tus amigos parece un poco extraño en época de una Luna llena?

Mareas en la Luna

Hay dos abultamientos de marea en la Luna, por la misma razón que hay dos abultamientos de marea en la Tierra; las caras cercana y lejana de cada cuerpo sienten un tirón distinto. Así, la Luna es estirada respecto a la forma esférica y queda un poco ovalada, con su eje largo apuntando hacia la Tierra. Sin embargo, a diferencia de las mareas terrestre, las lunares quedan en lugares fijos, sin subidas ni bajadas “diarias” de la Luna. Como la Luna tarda 27.3 días en dar una sola vuelta respecto a su propio eje (y también en torno al eje del sistema Tierra-Luna), siempre es la misma cara de la Luna la que ve hacia la Tierra. Esto se debe a que el centro de gravedad de la Luna alargada se desplaza un poco de su centro de masa, por lo que siempre que el eje largo de la Luna no está alineado hacia la Tierra (figura 9.20), la Tierra ejerce un momento de torsión ligero sobre la Luna, lo cual tiende a girar a la Luna para que se alinee con el campo gravitacional de la Tierra, como el momento de torsión que alinea la aguja de una brújula con el campo magnético. ¡Es la causa de que la Luna siempre nos muestre una misma cara!

Es interesante que este “seguro de marca” también funciona para la Tierra. Nuestros días se van alargando a una tasa de 2 milisegundos por siglo. En unos cuantos miles de millones de años, nuestro día durará un mes, y la Tierra siempre mostrará la misma cara a la Luna. ¿Qué te parece?

Campos gravitacionales

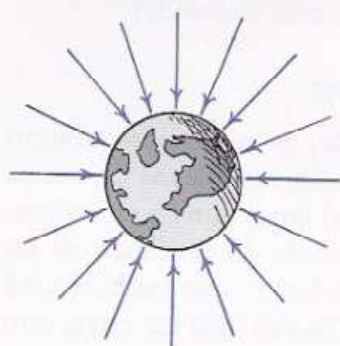


FIGURA 9.21

Las líneas de campo representan al campo gravitacional que rodea a la Tierra. Donde las líneas de campo están más cercanas entre sí, el campo es más intenso. Más lejos, donde las líneas de campo están más alejadas entre sí, el campo es más débil.

La Tierra y la Luna tiran una de otra. Se trata de una *acción a distancia*, porque interactúan entre sí aunque no estén en contacto. Lo podemos ver de una forma distinta, considerando que la Luna interactúa con el *campo gravitacional* de la Tierra. Las propiedades del espacio que rodea a cualquier cuerpo masivo se pueden considerar alteradas de tal forma, que otro cuerpo masivo en esta región sentirá una fuerza. Esta alteración del espacio es un *campo gravitacional*. Podemos imaginar una sonda espacial lejana que esté bajo la influencia del campo gravitacional donde se encuentre en el espacio, más que por la Tierra u otros planetas o estrellas. El concepto de campo juega un papel intermedio en nuestra idea de las fuerzas entre masas distintas.

El campo gravitacional es un ejemplo de un *campo de fuerzas*, porque un cuerpo con cualquier masa en el espacio del campo siente una fuerza. Otro campo de fuerzas, quizá más conocido, es un campo magnético. ¿Has visto limaduras de hierro alineadas en determinados patrones cerca de un imán? (Véase la figura 24.12 en la página 466, por ejemplo.) La figura de las limaduras muestra la intensidad y la dirección del campo magnético en distintos puntos en torno al imán. Donde las limaduras están más próximas entre sí, el campo es más intenso. La dirección de las limaduras indica la dirección del campo en cada punto.

La distribución del campo gravitacional terrestre se puede representar por líneas de campo (figura 9.21). Al igual que las limaduras de hierro en torno a un imán, las líneas de campo están más próximas entre sí donde el campo gravitacional es más intenso. En cada punto de una línea de campo, la dirección del campo en él es a lo largo de la línea. Las flechas indican la dirección del campo. Una partícula, un astronauta, una nave espacial o cualquier cuerpo en la cercanía de la Tierra será acelerado en dirección de la línea de campo que pase por ese lugar.

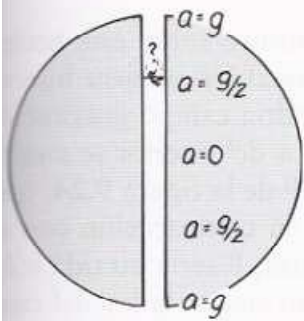


FIGURA 9.22
Cuando caes cada vez más rápido por un agujero que atraviesa toda la Tierra, tu aceleración disminuye, porque la parte de la masa de la Tierra que está abajo de ti es cada vez más pequeña. Menos masa equivale a menos tracción, hasta que en el centro la fuerza neta es cero y la aceleración es cero. La cantidad de movimiento hace que pases por el centro y subas contra una aceleración cada vez mayor, hasta el extremo opuesto del agujero, donde de nuevo la aceleración será g , dirigida hacia atrás, hacia el centro.

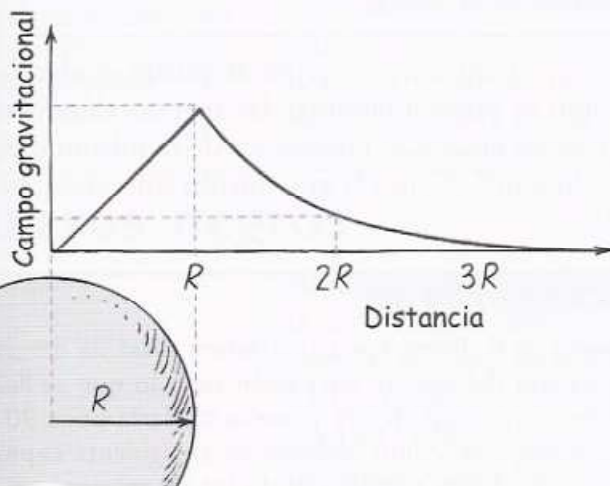


FIGURA 9.23
La intensidad del campo gravitatorio dentro de un planeta de densidad uniforme es directamente proporcional a la distancia radial a su centro, y es máxima en su superficie. En el exterior, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia a su centro.

La intensidad del campo gravitacional terrestre, al igual que la intensidad de su fuerza sobre los objetos, se apega a la ley del cuadrado inverso. Es más intensa cerca de la superficie de la Tierra y se debilita al aumentar la distancia a la Tierra.⁴

En la superficie terrestre, el campo gravitacional varía muy poco de un lugar a otro. Por ejemplo, sobre los depósitos subterráneos de plomo grandes, el campo es más intenso que el promedio. Sobre las grandes cavernas, quizá llenas de gas natural, el campo es ligeramente más débil. Para predecir qué está abajo de la superficie de la Tierra, los geólogos y los exploradores de petróleo y minerales realizan mediciones precisas del campo gravitacional terrestre.

Campo gravitacional en el interior de un planeta⁵

El campo gravitacional de la Tierra existe tanto dentro como fuera de ella. Imagina un agujero que atravesase toda la Tierra, desde el Polo Norte hasta el Polo Sur. Olvídate de inconvenientes como lava y altas temperaturas, e imagínate el movimiento que tendrías si cayeras en ese agujero. Si comenzaste en el extremo del Polo Norte, caerías y acelerarías durante toda la bajada hasta el centro, y a continuación perderías rapidez en toda la “subida” hasta el Polo Sur. Si no hubiera resistencia del aire, el viaje de ida tardaría casi 45 minutos. Si no pudieras asirte de la orilla al llegar al Polo Sur, caerías de regreso hacia el centro, y regresarías al Polo Norte en el mismo tiempo.

Tu aceleración a sería cada vez menor, a medida que continuaras bajando hacia el centro de la Tierra. ¿Por qué? Porque a medida que cayeras habría menos masa que tirara de ti hacia el centro. Cuando estuvieras en el centro de la Tierra, el tirón hacia abajo se equilibra con el tirón hacia arriba, y la fuerza neta sobre ti es cero, cuando pasaras zumbando a máxima rapidez por el centro de la Tierra.⁶ ¡El campo gravitacional de la Tierra es cero en su centro!

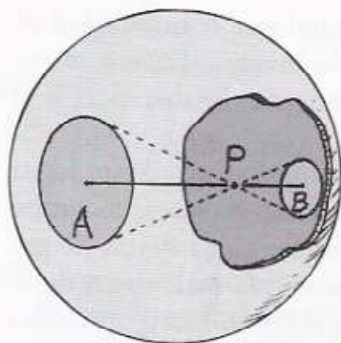
La composición de la Tierra varía, y tiene densidad máxima en su núcleo, con menos densidad en la superficie. Sin embargo, en el interior de un planeta hipotético de densidad uniforme, el campo en el interior aumentaría en forma lineal, es decir, a una tasa constante, desde cero en el centro hasta g en la superficie. No entraremos en el detalle de por qué sucede así. En cualquier caso, una gráfica de la intensidad del campo gravitacional dentro y fuera de un planeta macizo de densidad uniforme se observa en la figura 9.23.

Imagina una caverna esférica en el centro de un planeta. No tendría gravedad, porque la gravedad se anularía en todas direcciones.

⁴ La intensidad del campo gravitacional g en cualquier punto es igual a la fuerza F por unidad de masa que se coloque ahí. Entonces $g = F/m$, y sus unidades son newtons por kilogramo (N/kg). El campo g también es igual a la aceleración de caída libre de la gravedad. Las unidades N/kg y m/s^2 son equivalentes.

⁵ Esta sección se puede omitir en una descripción breve de los campos gravitacionales.

⁶ Es interesante considerar que durante los primeros kilómetros bajo la tierra tu aceleración aumentaría, porque la densidad del centro comprimido es mucho mayor que la de la superficie. Entonces la gravedad sería un poco más fuerte durante la primera parte de la caída. Después, la gravitación disminuiría y llegaría a cero en el centro de la Tierra.

**FIGURA 9.24**

El campo gravitacional en cualquier lugar del interior de un cascarón esférico con espesor y composición constantes es cero, porque los componentes del campo debidos a todas las partículas de masa en el cascarón se anulan entre sí. Por ejemplo, una masa en el punto P es atraída con igual fuerza a la región A (mayor pero más lejana), que a la región B (menor pero más cercana).



Campo gravitacional dentro de un planeta hueco



El peso de un objeto dentro de un planeta hueco salvo en su centro

Es sorprendente, pero el tamaño de la caverna no influye sobre este hecho ¡aunque constituya la mayor parte del volumen del planeta! Un planeta hueco, que fuera como un inmenso balón de básquetbol, no tendría campo gravitacional en todos los lugares de su interior. En todos los puntos del interior se anularía la gravedad. Para saber por qué, imagina la partícula P de la figura 9.24, que está el doble de alejada del lado izquierdo del planeta, en comparación con el lado derecho. Si la gravedad sólo dependiera de la distancia, P sería atraída sólo la cuarta parte hacia el lado izquierdo que al lado derecho (según la ley del cuadrado inverso). Pero la gravedad también depende de la masa. Imagina un cono que vaya hasta la izquierda, con punta en P, y que abarque la región A de la figura; además un cono de igual ángulo hacia la derecha, para abarcar la región B. La región A tendrá cuatro veces el área, por lo tanto, cuatro veces la masa de la región B. Como $1/4$ de 4 es igual a 1, P es atraída hacia la región A, más alejada pero más masiva, exactamente con la misma fuerza que hacia la región B, más cercana pero menos masiva. Se anulan las atracciones. Si se investiga más se demuestra que la anulación sucede en cualquier lugar del interior de un cascarón planetario que tenga espesor y composición uniformes. Existiría un campo gravitacional en su superficie externa y hacia el exterior, y se comportaría como si toda la masa del planeta se concentrara en su centro; pero en todo el interior de la parte hueca el campo gravitacional es cero. Quienquiera que allí estuviera se sentiría sin peso.

EXAMÍNATE

1. Supón que caes en un agujero que atraviesa la Tierra pasando por su centro, y que no intentas sujetarte de la orilla en los extremos del agujero. Sin tener en cuenta la resistencia del aire, ¿qué clase de movimiento adquirirías?
2. A la mitad del camino al centro de la Tierra, ¿la fuerza de gravedad sobre ti sería menor que en la superficie de la Tierra?

Aunque dentro de un cuerpo o entre dos cuerpos se puede anular la gravedad, no se puede eliminar como se pueden eliminar las fuerzas eléctricas. En el capítulo 22 veremos que las fuerzas eléctricas pueden ser de repulsión o de atracción, lo cual hace posible el “blindaje”. Como la gravitación sólo atrae, no puede haber algún blindaje parecido.

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Oscilarías subiendo y bajando. Si la Tierra fuera una esfera ideal de densidad uniforme y no hubiera resistencia del aire, tu oscilación sería lo que se llama movimiento armónico simple. Cada viaje de ida y vuelta tardaría unos 90 minutos. Es interesante hacer notar que, como veremos en el siguiente capítulo, un satélite en órbita cercana a la Tierra también tarda los 90 minutos en hacer un viaje redondo. (No es coincidencia, porque si estudias más física aprenderás que el movimiento “de vaivén”, que es el movimiento armónico simple, no es más que el componente vertical del movimiento circular uniforme.)
2. La fuerza gravitacional sobre ti sería menor porque hay menos masa de la Tierra abajo de ti, y te atrae con menos fuerza. Si la Tierra fuera una esfera uniforme de densidad uniforme, la fuerza gravitacional a la mitad de la distancia al centro sería exactamente la mitad que en la superficie. Pero como el núcleo terrestre es tan denso (unas siete veces mayor que la densidad de la roca superficial), la fuerza gravitacional a media bajada sería algo mayor que la mitad. La cantidad exacta depende de cómo varía la densidad de la Tierra en función de la profundidad, y esa información aún no se conoce.

Los eclipses son prueba convincente de esto. La Luna está en el campo gravitacional tanto de la Tierra como del Sol. Durante un eclipse lunar, la Tierra está directamente entre la Luna y el Sol, y si hubiera algún blindaje del campo del Sol debido a la Tierra, causaría una desviación de la órbita de la Luna. Aun cuando fuera un blindaje muy pequeño, se acumularía al paso de los años y se traduciría en los intervalos de los eclipses sucesivos. Pero no ha habido tales discrepancias; los eclipses del pasado y del futuro se calculan con mucha exactitud usando sólo la sencilla ley de la gravitación. No se ha encontrado efecto de blindaje contra la gravitación.

Teoría de Einstein sobre la gravitación

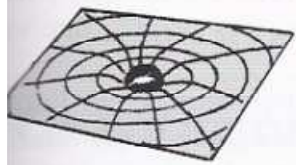


FIGURA 9.25

El espacio-tiempo deformado. Cerca de una estrella, el espacio-tiempo es curvo. En cuatro dimensiones, en forma parecida a como se deforma la superficie bidimensional de una cama de agua cuando descansa sobre ella una pelota pesada.

A principios del siglo xx Einstein, en su teoría general de la relatividad, presentó un modelo de la gravedad bastante distinto del de Newton. Einstein concibió al campo gravitacional como una deformación geométrica de espacio y tiempo tetradimensional. Se dio cuenta de que los cuerpos provocan deformaciones en el espacio y el tiempo, de manera parecida a como una pelota masiva colocada a la mitad de una cama de agua grande combe la superficie bidimensional (figura 9.25). Cuanto más masiva sea la pelota, será mayor la deformación. Si rodamos una canica cruzando la cama, muy lejos de la pelota, la canica rodará en trayectoria rectilínea. Pero si la rodamos cerca de la pelota desviará su trayectoria al rodar por la superficie deformada de la cama. Si la curva se cierra en sí misma, la canica quedará en órbita en torno a la pelota, describiendo una trayectoria ovalada o circular. Si te pones tus anteojos de Newton, para ver la pelota y la canica, pero no la cama, podrías llegar a la conclusión que la canica se desvía porque es atraída hacia la pelota. Si te pones tus anteojos de Einstein, para ver la canica y la cama deformada, pero no la pelota “lejana”, es probable que llegues a la conclusión de que la canica se desvía porque la superficie sobre la cual se mueve es curva, en dos dimensiones en el caso de la cama, y en cuatro dimensiones en el caso del espacio y del tiempo.⁷ En el capítulo 36 explicaremos con mayor detalle la teoría de Einstein sobre la gravitación.

Agujeros negros

Supón que fueras indestructible, y que pudieras viajar en una nave espacial hasta la superficie de una estrella. Tu peso dependería de tu masa y de la masa de la estrella, así como de la distancia entre el centro de la estrella y tu ombligo. Si la estrella se quemara y se colapsara hasta la mitad de su radio sin cambiar su masa, tu peso en la superficie, calculado con la ley del cuadrado inverso, aumentaría cuatro veces (figura 9.26). Si la estrella se encogiera hasta una décima de su radio, tu peso en su superficie sería 100 veces mayor. Si la estrella se siguiera reduciendo, el campo gravitacional en su superficie sería más intenso. Cada vez sería más difícil despegar la nave espacial. La velocidad necesaria para escapar, que es la *velocidad de escape*, aumentaría. Si una estrella como nuestro Sol se comprimiera hasta que su radio fuera menor de 3 kilómetros, la velocidad de escape de su superficie sería mayor que la velocidad de la luz y ¡nada podría escapar, ni siquiera la luz! El Sol sería invisible. Sería un agujero negro.

⁷ No te desanimes si no te puedes imaginar el espacio-tiempo tetradimensional. Einstein mismo con frecuencia decía a sus amigos: “No traten. Tampoco yo puedo.” Quizá no somos muy distintos de los grandes pensadores que rodeaban a Galileo y ¡no se podían imaginar que la Tierra se estuviera moviendo!



Al contrario de lo que narran las historias acerca de los agujeros negros, éstos no son agresivos ni tampoco atrapan inocentes a la distancia para engullírselos. Sus campos gravitacionales no son más fuertes que los campos originales que había alrededor de las estrellas antes de que colapsaran, excepto a distancias menores que el radio original de cada una. A excepción de cuando están demasiado cerca, los agujeros negros no deberían preocupar a los futuros astronautas.

¡EUREKA!

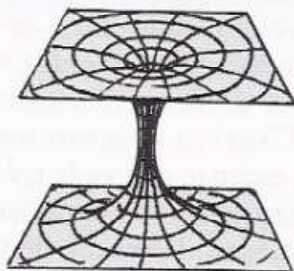


FIGURA 9.28

Un agujero de gusano podría ser el portal hacia otra parte de nuestro Universo, o bien hacia Otro Universo.

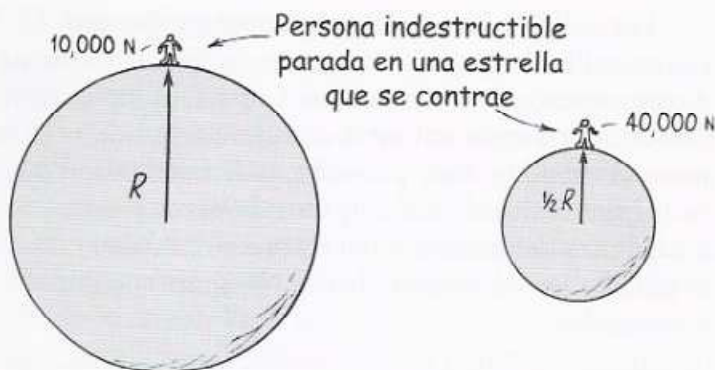


FIGURA 9.26

Si una estrella se contrae hasta que su radio sea de la mitad y no cambia su masa, la gravitación en su superficie se multiplica por 4.

En realidad, el Sol tiene muy poca masa para colapsarse de esa manera, pero cuando algunas estrellas con mayor masa (que ahora se calcula como mínimo 1.5 masas solares) agotan sus reservas nucleares, se colapsan. A menos que su rotación sea suficientemente alta, la contracción continúa hasta que sus densidades se vuelven infinitas. Cerca de esas estrellas encogidas, la gravitación es tan enorme que ni la luz puede escapar en su cercanía. Se han aplastado a sí mismas y han salido de la existencia visible. Los resultados son los agujeros negros, que son totalmente invisibles.

Un agujero negro no es más masivo que la estrella que lo formó, por lo que el campo gravitacional en regiones, en o cerca, del radio original de esa estrella no es distinto después que antes del colapso. Pero a menores distancias, cerca de un agujero negro, el campo gravitacional puede ser enorme; es un torcimiento de los alrededores hacia el cual es succionado todo lo que pase demasiado cerca: luz, polvo o nave espacial. Los astronautas podrían entrar a la orilla de esta deformación, y escapar todavía con una poderosa nave espacial. Sin embargo, más cerca que determinada distancia, no podrían hacerlo, y desaparecerían del Universo observable. Todo objeto que cayera en un agujero negro sería despedazado. Ninguna de sus propiedades sobreviviría, excepto su masa, su cantidad de movimiento angular (si lo tuviera) y su carga eléctrica (si fuera el caso).

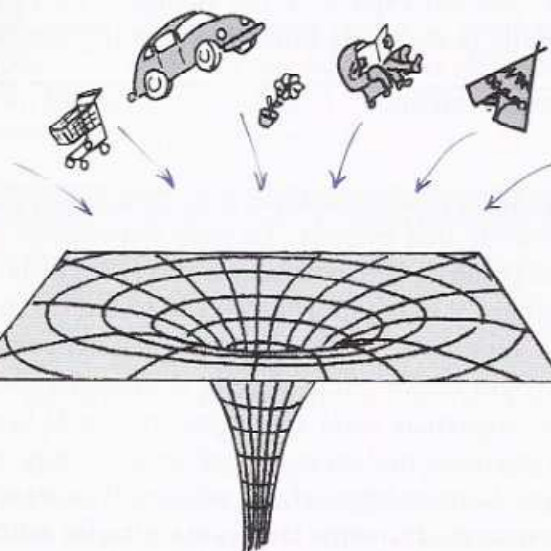


FIGURA 9.27

Todo lo que cae dentro de un agujero negro es aplastado. El agujero negro sólo conserva la masa, la cantidad de movimiento angular y la carga eléctrica de lo que le cae.

Una entidad teórica que se parece algo a un agujero negro es el "agujero de gusano" (figura 9.28). Al igual que un agujero negro, uno de gusano es una distorsión enorme del espacio y el tiempo. Pero en vez de colapsarse hacia un punto de densidad infinita, el agujero de gusano se abre de nuevo en alguna otra parte del Universo o también, si se puede concebir, a algún Otro Universo. Mientras que se ha confirmado la existencia de los agujeros negros, lo del agujero de gusano

sigue siendo especulación. Algunos físicos imaginan que los agujeros de gusano abren la posibilidad de viajar en el tiempo.⁸

Pero ¿cómo se puede detectar un agujero negro si literalmente no hay forma de “verlo”? Se hace sentir por su influencia gravitacional sobre las estrellas vecinas. Ahora contamos con buenas evidencias de que algunos sistemas de estrellas binarias están formados por una estrella luminosa y una compañera invisible, con propiedades de agujero negro, y se mueven en órbitas recíprocas. Hay pruebas todavía más convincentes de que hay agujeros negros más masivos en los centros de muchas galaxias. En una galaxia joven se observa como un “cuasar”, en el centro de un agujero negro, succiona materia que emite grandes cantidades de radiación al sumergirse en el olvido. En una galaxia más vieja se observa que las estrellas describen círculos en torno a un intenso campo gravitacional que rodea a un centro aparentemente vacío. Estos agujeros negros galácticos tienen masas que van de millones a más de mil millones de veces la masa de nuestro Sol. El centro de nuestra propia galaxia, aunque no es tan fácil de ver como los de otras, casi con seguridad alberga un agujero negro. Los descubrimientos se hacen ya con más frecuencia que lo que pueden presentar los libros de texto. Ve a tu sitio Web favorito de astronomía para que conozcas lo más reciente del tema.

Gravitación universal



Una esfera tiene el área de superficie más pequeña que cualquier otro volumen de materia.

¡EUREKA!

Todos sabemos que la Tierra es redonda. Pero ¿por qué es redonda? Es por la gravitación. Todo atrae a todo lo demás, y la Tierra se ha atraído a sí misma ¡todo lo posible! Han sido atraídos todos los “rincones” de la Tierra y, en consecuencia, todas las partes de su superficie son equidistantes al centro de gravedad. Eso es lo que forma una esfera. Por lo tanto, vemos que de acuerdo con la ley de la gravitación que el Sol, la Luna y la Tierra son esféricos porque deben serlo. (Aunque los efectos de la rotación los hacen un poco elípticos.)

Si todo tira de todo lo demás, entonces los planetas deben tirar unos de otros. Por ejemplo, la fuerza que controla a Júpiter no sólo es la fuerza desde el Sol. También están los tirones de los demás planetas. Su efecto es pequeño en comparación con el tirón del Sol, que es mucho más masivo; sin embargo, se percibe. Cuando Saturno está cerca de Júpiter, su tirón perturba la trayectoria que sigue Júpiter, que por lo demás es uniforme. Ambos planetas “cabecean” respecto a sus

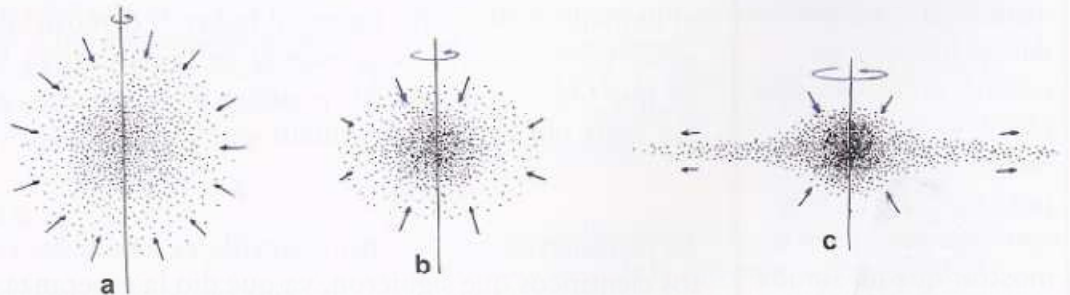


FIGURA 9.29

Formación del sistema solar. Una esfera de gas interestelar, que gira lentamente *a*) se contrae a causa de la gravitación mutua y *b*) conserva su cantidad de movimiento angular pero aumenta su rapidez. El incremento en la cantidad de movimiento de las partículas independientes y los grupos de ellas las hace *c*) recorrer trayectorias más amplias en torno al eje de rotación, y se produce una forma discooidal en general. La mayor área superficial del disco impulsa el enfriamiento y la condensación de la materia en torbellinos: es el nacimiento de los planetas.

⁸ Stephen Hawking, un experto pionero en agujeros negros, fue uno de los primeros en especular acerca de la existencia de los agujeros de gusano. Pero, en 2003, ante la consternación de muchos entusiastas de la ciencia, Hawking anunció que tal vez no existan.



Una suposición muy difundida sostiene que cuando la Tierra dejó de considerarse el centro del Universo, su lugar y la humanidad fueron degradados y dejaron de considerarse especiales. Al contrario, los escritos de la época sugieren que la mayoría de los europeos veían a los humanos como inmundos y pecadores a causa de la humilde posición de la Tierra, más alejada del cielo y con el infierno en su centro. La elevación del ser humano no ocurrió sino hasta que el Sol, visto positivamente, tomó una posición central. Nos volvimos especiales al mostrar que no somos especiales.

¡EUREKA!

órbitas esperadas. Las fuerzas interplanetarias que causan estos cabeceos se llaman *perturbaciones*. En la década de 1840, los estudios de Urano, un planeta recién descubierto en aquel entonces, indicaban que no se podían explicar las desviaciones de su órbita mediante perturbaciones debidas a todos los demás planetas. O la ley de la gravitación fallaba a esta gran distancia del Sol, o había un octavo planeta, desconocido, perturbando a Urano. Fueron J. C. Adams y Urbain Leverrier, un inglés y un francés, quienes supusieron que la ley de Newton es válida, y calcularon dónde debería estar el octavo planeta. Más o menos al mismo tiempo, Adams mandó una carta al Observatorio de Greenwich, en Inglaterra, y Leverrier mandó la suya al Observatorio de Berlín, en Alemania, sugiriendo que se debería buscar un nuevo planeta en determinada zona del cielo. La petición de Adams demoró, por malos entendidos en Greenwich, pero la de Leverrier fue atendida de inmediato. ¡Esa misma noche fue descubierto el planeta Neptuno!

Los estudios de la órbita de Neptuno y de Urano condujeron a predecir y a descubrir Plutón, en 1930, en el observatorio Lowell, en Arizona. Gracias a la investigación reciente, muchos astrónomos consideran que Plutón es un asteroide y no un planeta verdadero. Recientemente más allá de Neptuno se han descubierto muchos asteroides con tamaños cercanos a un planeta, y ello seguramente continuará ocurriendo (Quaoar, por ejemplo, es un asteroide que tiene su propia luna). Los astrónomos se enfrentan al problema de si clasificar a la creciente lista de vecinos de Plutón o incluso a éste como planeta. En vez de considerar a Plutón como el más insignificante de los planetas, ahora muchos lo catalogan como el rey de los asteroides. En cualquier caso, el objeto al que llamamos Plutón tarda 248 años en realizar una sola revolución en torno al Sol, por lo que nadie lo verá en la posición en que fue descubierto sino hasta el año de 2178.

Evidencia reciente sugiere que el Universo se expande y acelera hacia fuera, empujado por la *energía oscura* de antigravedad, que constituye el 73% del mismo. Otro 23% está compuesto de partículas de *materia oscura* aún por descubrir. La materia ordinaria, el material de las estrellas y de todo cuanto conocemos constituye apenas el 4%. Los conceptos de energía oscura y materia oscura son confirmaciones de finales del siglo XX y principios del XXI. La actual visión del Universo ha progresado notablemente con respecto al que concibió Newton.

Pocas teorías han influido tanto sobre la ciencia y la civilización como la teoría de Newton de la gravitación. Los éxitos de las ideas de Newton dieron origen al llamado Siglo de las Luces, al haber él demostrado que si observa y razona, la gente podría descubrir la esencia de la naturaleza física. ¡Qué profundidad hay en que todas las lunas, los planetas y las estrellas, así como las galaxias, tengan esa regla tan bellamente sencilla que los rige:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

La formulación de esta regla sencilla es una de las razones principales de los éxitos científicos que siguieron, ya que dio la esperanza para describir también otros fenómenos del mundo mediante leyes igual de sencillas y universales.

Esta esperanza nutrió el pensamiento de muchos científicos, artistas, escritores y filósofos del siglo XVIII. Uno de ellos fue John Locke, inglés, que sostenía que la observación y la razón, como lo demostró Newton, deben ser nuestro mejor juez y guía en todas las cosas, y que toda la naturaleza y hasta la sociedad se debe investigar para intentar descubrir todas las "leyes naturales" que pudieran existir. Usó la física de Newton como modelo de razonamiento. Locke y sus seguidores modelaron un sistema de gobierno que encontró partidarios en las trece colonias británicas de más allá del Atlántico. Estas ideas culminaron en la Declaración de Independencia y en la Constitución de los Estados Unidos de América.

Resumen de términos

Agujero negro Concentración de masa debida a un colapso gravitacional, cerca del cual la gravedad es tan intensa que ni siquiera la luz puede escapar a él.

Campo gravitacional Influencia que ejerce un cuerpo masivo en el espacio que lo rodea, produciendo una fuerza sobre otro cuerpo masivo. Se mide en newtons por kilogramo (N/kg).

Ingravidez Condición que se encuentra en la caída libre, donde falta una fuerza de soporte.

Ley de la gravitación universal Todo cuerpo en el Universo atrae a los demás cuerpos, y la fuerza entre dos cuerpos es proporcional al producto de sus masas, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

Ley del inverso del cuadrado Es una ley que relaciona la intensidad de un efecto con el inverso del cuadrado de la distancia hasta la causa:

$$\text{Intensidad} \sim \frac{1}{\text{distancia}^2}$$

La gravedad sigue una ley del inverso del cuadrado, así como los efectos de los fenómenos eléctricos, magnéticos, luminosos, sonoros y radiantes.

Mareas muertas Marea que sucede cuando la Luna está a mediados de la Luna nueva y la Luna llena, o viceversa. Las mareas producidas por el Sol y la Luna se anulan en parte, haciendo que las pleamares sean más bajas que el promedio, y las bajamares sean más altas que el promedio.

Mareas vivas Marea alta o baja que sucede cuando el Sol, la Tierra y la Luna están alineados, de manera que coincidan las mareas debidas al Sol y a la Luna, y hagan que las pleamares sean más altas y las bajamares sean más bajas que el promedio.

Peso Fuerza que un objeto ejerce sobre una superficie de soporte (o, cuando está suspendido, sobre una cuerda de soporte), la cual a menudo, aunque no siempre, se debe a la fuerza de gravedad.

Lecturas sugeridas

Cole, C. K. *The Hole in the Universe: How Scientist Peered over the Edge of Emptiness and Found Everything*. Nueva York: Harcourt, 2001.

Einstein, A. y L. Infeld. *The Evolution of Physics*. Nueva York: Simon & Schuster, 1938.

Gamow, G. *Gravity*. Science Study Series. Garden City, N. Y.: Doubleday (Anchor), 1962.

Preguntas de repaso

1. ¿Qué descubrió Newton acerca de la gravedad?
2. ¿Cuál es la síntesis newtoniana?

La ley universal de la gravedad

3. ¿En qué sentido “se cae” la Luna?
4. En palabras enuncia la ley de Newton de la gravitación universal. A continuación enúnciala con una ecuación.

La constante G de la gravitación universal

5. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza gravitacional entre dos cuerpos de 1 kilogramo que están separados 1 metro?
6. ¿Cuál es la magnitud de la fuerza gravitacional entre la Tierra y un cuerpo de 1 kilogramo?
7. ¿Cómo le llamamos a la fuerza gravitacional entre la Tierra y tu cuerpo?
8. Cuando Henry Cavendish midió el valor de G, los periódicos de la época anunciaron la noticia como el “experimento para pesar el mundo”. ¿Por qué?

Gravedad y distancia: la ley del inverso del cuadrado

9. ¿Cómo varía la fuerza de la gravedad entre dos cuerpos, cuando la distancia entre ellos aumenta al doble?
10. ¿Cómo varía el espesor de una pintura rociada sobre una superficie, si el aspersor se aleja al doble de la distancia?
11. ¿Cómo varía la intensidad de la luz cuando una fuente luminosa puntual se aleja al doble de distancia?
12. ¿Dónde pesas más: en el fondo del Valle de la Muerte o en la cumbre de los picos de la Sierra Nevada? ¿Por qué?

Peso e ingravidez

13. ¿Los resortes del interior de una báscula de baño se comprimirían más o menos, si te pesaras en un elevador que acelerara hacia arriba? ¿Y si acelerara hacia abajo?
14. ¿Los resortes del interior de una báscula de baño se comprimirían más o menos, si te pesaras en un elevador que subiera con *velocidad constante*? ¿Y si bajara con *velocidad constante*?
15. ¿Cuándo tu peso es igual a mg?
16. Menciona un ejemplo de cuando tu peso es mayor que mg. Describe un ejemplo de cuando tu peso es cero.

Mareas

17. ¿Las mareas dependen más de la intensidad del tirón gravitacional o de la *diferencia* de intensidades? Explica por qué.
18. ¿Por qué el Sol y la Luna ejercen una fuerza gravitacional mayor en un lado de la Tierra que en el otro?
19. (Llena el espacio.) La fuerza de gravedad (con unidades de N) depende del inverso del cuadrado de la distancia. Pero la fuerza de marea, que es la diferencia de fuerzas gravitacionales por unidad de masa (con unidades de N/kg) depende del inverso del _____ de la distancia.
20. Distingue entre *marea viva* y *marea muerta*.

Mareas en la Tierra y en la atmósfera

21. ¿Se producen mareas en el interior fundido de la Tierra por la misma razón que se producen en los océanos?
22. ¿Por qué todas las mareas son máximas cuando hay Luna llena o Luna nueva?

Mareas en la Luna

23. ¿El hecho de que una misma cara de la Luna vea siempre hacia la Tierra significa que la Luna gira en torno a su eje (como un trompo) o que no gira en torno a su eje?
24. ¿Por qué hay un momento de torsión en el centro de masa de la Luna, cuando el eje largo de su rotación no está alineado con el campo gravitacional terrestre?
25. ¿Existe un momento de torsión en el centro de masa de la Luna cuando su eje largo está alineado con el campo gravitacional terrestre? Explica cómo esto se compara con una brújula.

Campos gravitacionales

26. ¿Qué es un campo gravitacional y cómo se puede detectar su presencia?

Campo gravitacional en el interior de un planeta

27. ¿Cuál es la magnitud del campo gravitacional en el centro de la Tierra?
28. Para un planeta de densidad uniforme, ¿cómo se compara la magnitud del campo gravitacional a la mitad del camino hacia el centro en relación, con el que hay en la superficie?
29. ¿Cuál podría ser la magnitud del campo gravitacional en cualquier lugar del interior de un planeta esférico hueco?

Teoría de Einstein de la gravitación

30. Newton consideró que la trayectoria de un planeta se desvía debido a que sobre él actúa una fuerza. ¿Cómo consideró Einstein la desviación de un planeta?

Agujeros negros

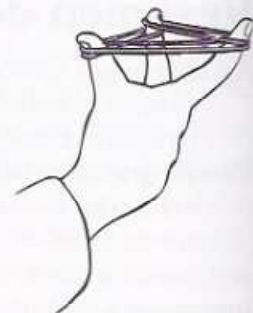
31. Si la Tierra se contrajera sin cambiar de masa, ¿qué debería suceder con tu peso en la superficie?
32. ¿Qué sucede a la intensidad del campo gravitacional en la superficie de una estrella que se contrae?
33. ¿Porqué un agujero negro es invisible?

Gravitación universal

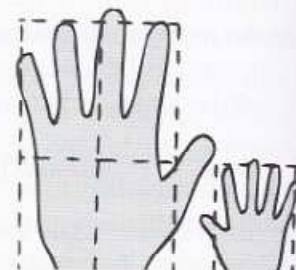
34. ¿Cuál fue la causa de las perturbaciones descubiertas en la órbita del planeta Urano? ¿A qué gran descubrimiento condujo lo anterior?
35. ¿Qué porcentaje del Universo se especula actualmente que está compuesto de materia y energía oscuras?

Proyectos

1. Mantén levantados tus dedos pulgar, índice y medio y forma un triángulo. Pon una banda de hule gruesa en tu pulgar y tu índice. Representa la fuerza de gravedad entre el Sol y la Tierra. Pon una banda de hule regular entre tu pulgar y tu dedo medio, que represente la fuerza de gravedad entre el Sol y la Luna. A continuación pon una banda delgada de hule entre tu pulgar y tu índice, que represente la fuerza de gravedad entre la Luna y la Tierra. Observa cómo los dedos tiran uno del otro. Es igual con los tirones gravitacionales entre el Sol, la Tierra y la Luna.



2. Pon tus manos extendidas, una al doble de distancia de tus ojos que la otra, y haz una declaración de cuál mano se ve más grande. La mayoría de la gente diría que tienen más o menos el mismo tamaño, y muchas personas dirían que la mano más cercana es un poco mayor.



- Casi nadie, en una primera apreciación, dirá que la mano más cercana es cuatro veces mayor. Pero de acuerdo con la ley del cuadrado inverso, la mano más cercana debe parecer dos veces más alta y dos veces más ancha y, por lo tanto, debe ocupar cuatro veces más campo visual que la mano alejada. Estás tan convencido de que las dos manos tienen el mismo tamaño que es probable que no tengas en cuenta esta información. Ahora, si encimas un poco tus manos y cierras un ojo, verás con claridad que la mano más cercana parece mayor. Lo anterior hace surgir una pregunta: ¿Qué otras ilusiones has visto que no se comprueban con tanta facilidad?
3. Repite el experimento anterior, pero esta vez usa dos billetes, uno normal y el otro doblado a la mitad a lo largo, y de nuevo a la mitad a lo ancho, para que tenga 1/4 de la superficie. Ahora mantén los dos frente a tus ojos. ¿Dónde tienes que poner el billete doblado para que parezca tener el mismo tamaño que el que no está doblado? Interesante, ¿no?

Cálculos de un paso

$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

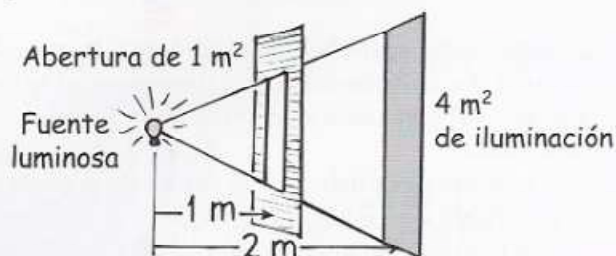
1. Calcula la fuerza de gravedad sobre una masa de 1 kg en la superficie de la Tierra. La masa de la Tierra es de 6×10^{24} kg, y su radio es de 6.4×10^6 m.

2. Calcula la fuerza de gravedad sobre la misma masa de 1 kg si estuviera a 6.4×10^6 m por encima de la superficie de la Tierra (es decir, a una distancia de dos radios a partir del centro de la Tierra).
3. Calcula la fuerza de gravedad entre la Tierra (masa = 6.0×10^{24} kg) y la Luna (masa = 7.4×10^{22} kg). La distancia promedio entre la Tierra y la Luna es de 3.8×10^8 m.
4. Calcula la fuerza de gravedad entre la Tierra y el Sol (masa del Sol = 2.0×10^{30} kg; distancia promedio entre la Tierra y el Sol = 1.5×10^{11} m).
5. Calcula la fuerza de gravedad entre un recién nacido (masa $\times 3$ kg) y el planeta Marte (masa $\times 6.4 \times 10^{23}$ kg), cuando este último está en su posición más cercana a la Tierra (distancia = 5.6×10^{10} m).
6. Calcula la fuerza de gravedad entre un recién nacido cuya masa es de 3 kg y la masa del obstetra de 100 kg, que está a 0.5 m del bebé. ¿Quién ejerce mayor fuerza gravitacional sobre el bebé: Marte o el obstetra? ¿Cuánto más?

Ejercicios

1. Haz comentarios de si es preocupante esta etiqueta de un producto al consumidor: *PRECAUCIÓN: La masa de este producto tira de todas las demás masas del Universo, con una fuerza de atracción que es proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas.*
2. La fuerza gravitacional actúa sobre todos los cuerpos en proporción con sus masas. Entonces, ¿por qué un cuerpo celeste pesado no cae con más rapidez que uno ligero?
3. ¿Cómo sería el camino a la Luna, si de alguna forma todas las fuerzas gravitacionales se redujeran a cero?
4. ¿La fuerza de gravedad es mayor sobre un trozo de hierro que sobre un trozo de madera, si ambos tienen la misma masa? Sustenta tu respuesta.
5. ¿La fuerza de gravedad es mayor sobre una bola de papel en comparación con el mismo papel sin arrugar? Sustenta tu respuesta.
6. ¿Cuál es la relación entre fuerza y la distancia en una ley del cuadrado inverso?
7. ¿Por qué Newton no pudo determinar la magnitud de G con su ecuación?
8. Un amigo te dice que como la gravedad de la Tierra es mucho mayor que la de la Luna, las rocas de la Luna podrían caer a la Tierra. ¿Qué de impreciso tiene tal aseveración?
9. Otro amigo te dice que la gravedad de la Luna evitaría que las rocas que se caen en la Luna lleguen a la Tierra, pero que si de alguna forma la gravedad de la Luna desapareciera, entonces las rocas de la Luna sí caerían sobre la Tierra. ¿Qué tiene de incorrecta esta hipótesis?
10. Un amigo te dice que los astronautas en órbita no tienen peso, porque están más allá del tirón gravitacional de la Tierra. Corrige la apreciación de tu amigo.
11. En algún lugar entre la Tierra y la Luna, la gravedad de estos dos cuerpos sobre una nave espacial se debe anular. ¿Tal lugar está más cerca de la Tierra o de la Luna?
12. Una manzana cae debido a la fuerza de gravedad que la Tierra ejerce hacia ella. ¿Cómo es en comparación la atracción gravitacional que la manzana ejerce hacia la Tierra? (¿La fuerza cambia cuando sustituyes m_1 y m_2 en la ecuación de la gravedad: $m_1 m_2$ en vez de $m_1 m_2$?)
13. Larry pesa 300 N en la superficie de la Tierra. ¿Cuál sería el peso de la Tierra en el campo gravitacional de Larry?
14. La Tierra y la Luna se atraen entre sí debido a la fuerza gravitacional. ¿La Tierra, que es más masiva, atrae a la Luna, que es menos masiva, con una fuerza mayor, menor o igual a la fuerza con la que la Luna atrae a la Tierra? (Con una banda elástica tensionada entre tu pulgar y tu índice, ¿de cuál dedo tira más la banda, de tu pulgar o de tu índice?)
15. Si la Luna tira de la Tierra con igual fuerza que la Tierra tira de la Luna, ¿por qué la Tierra no gira en torno a la Luna, o por qué ambos cuerpos no giran en torno a un punto a la mitad de su distancia?
16. ¿La aceleración de la gravedad es mayor o menor en la cima del Monte Everest que a nivel del mar? Sustenta tu respuesta.
17. Un astronauta desciende en la superficie de un planeta que tiene igual masa que la Tierra pero el doble del diámetro. ¿Cómo difiere el peso del astronauta del que tendría en la Tierra?
18. Un astronauta desciende en un planeta que tiene el doble de masa de la Tierra y el doble del diámetro. ¿Cómo difiere el peso del astronauta del que tendría en la Tierra?
19. Si en alguna forma la Tierra se expandiera y su radio fuera mayor, pero sin cambiar su masa, ¿cómo cambiaría tu peso? ¿Cómo se afectaría si la Tierra se contrajera? (Sugerencia: deja que la ecuación de la fuerza gravitacional guíe tus razonamientos.)
20. La intensidad de la luz procedente de una fuente central varía inversamente con el cuadrado de la distancia. Si vivieras en un planeta a la mitad de la distancia del Sol a la Tierra, ¿cómo se compararía la intensidad luminosa con la de la Tierra? ¿Y si el planeta estuviera diez veces más lejos del Sol que la Tierra?
21. Una pequeña fuente luminosa está a 1 m frente a una abertura de 1 m^2 , e ilumina una pared que está atrás. Si la pared está a 1 m atrás de la abertura (a 2 m de la fuente luminosa), el área iluminada abarca 4 m^2 .

¿Cuántos metros cuadrados quedarán iluminados si la pared está a 3 m de la fuente luminosa? ¿Y a 5 m? ¿Y a 10 m?



22. Júpiter es más de 300 veces más masivo que la Tierra; entonces parecería que un cuerpo sobre la superficie de Júpiter pesaría 300 veces más que en la Tierra. Pero no es así, porque un cuerpo apenas pesaría tres veces más en la superficie de Júpiter, que en la superficie de la Tierra. ¿Puedes dar una explicación de por qué sucede así? (Sugerencia: deja que los términos de la ecuación de la fuerza gravitacional guíen tu pensamiento.)
23. ¿Por qué los pasajeros de un avión a gran altura tienen la sensación de que pesan, mientras que los pasajeros de un vehículo espacial en órbita, por ejemplo los del trasbordador espacial, sienten que no pesan?
24. ¿Por qué una persona en caída libre no tiene peso, mientras que una persona que caiga a su velocidad terminal sí?
25. Si estuvieras en un coche que se desbarrancara, ¿por qué momentáneamente no tendrías peso? ¿La gravedad seguiría actuando sobre ti?
26. ¿Una fuerza gravitacional actúa sobre una persona que se desbarranca? ¿Y sobre un astronauta dentro del trasbordador espacial en órbita?
27. ¿Cuáles son las dos fuerzas que actúan sobre ti mientras vas en un elevador? ¿Cuándo son iguales en magnitud estas dos fuerzas y cuándo no los son?
28. Si estuvieras en un elevador en caída libre y dejaras caer un lápiz, se quedaría suspendido frente a ti. ¿Hay alguna fuerza de gravedad sobre el lápiz? Sustenta tu respuesta.
29. ¿Por qué una persona que se lanza en bungee experimenta ingravidez durante el salto?
30. Puesto que tu peso cuando estás parado sobre la Tierra es la atracción gravitacional entre tu persona y nuestro planeta, ¿tu peso sería mayor si la Tierra ganara masa? ¿Y si el Sol ganara masa? ¿Por qué tus respuestas son iguales o diferentes?
31. Un amigo te dice que la razón primordial por la que los astronautas que están en órbita experimentan ingravidez es que están más allá del tirón que ejerce la gravedad de la Tierra. ¿Estás de acuerdo o en desacuerdo?
32. Explica por qué está equivocada la siguiente deducción. "El Sol atrae a todos los cuerpos en la Tierra. A media noche, cuando el Sol está directamente abajo, tira de ti en la misma dirección que la Tierra tira de ti. A mediodía, cuando el Sol está directamente arriba, tira de ti en dirección opuesta al tirón de la Tierra sobre ti. En consecuencia, debes pesar un poco más a media noche, y un poco menos a medio día." (Sugerencia: relaciona esto con los dos ejercicios anteriores.)
33. ¿Cuándo será mayor la fuerza gravitacional entre ti y el Sol: hoy al mediodía o mañana a medianoche? Sustenta tu respuesta.
34. Si la masa de la Tierra aumentara, tu peso aumentaría en consecuencia. Pero si la masa del Sol aumentara, tu peso no se afectaría. ¿Por qué?
35. En la actualidad, la mayoría de las personas saben que las mareas se deben principalmente a la influencia gravitacional de la Luna. En consecuencia, la mayoría de las personas creen que el tirón gravitacional de la Luna sobre la Tierra es mayor que el tirón gravitacional del Sol sobre la Tierra. ¿Qué opinas?
36. Si alguien te arrastrara de la manga de tu camisa, es probable que se rasgue. Pero si tiraran por igual de todas las partes de tu camisa, no habría rasgaduras. ¿Cómo se relaciona esto con las fuerzas de marea?
37. ¿Existirían mareas si el tirón gravitacional de la Luna (y el Sol) se igualaran, de alguna manera, en todo el mundo? Explica por qué.
38. ¿Por qué no hay pleamares exactamente cada 12 horas?
39. Con respecto a las mareas vivas y muertas, ¿cuándo hay mareas más bajas? Esto es, ¿cuándo es mejor buscar ostras?
40. Siempre que la marea sube en forma extraordinaria, ¿irá seguida de una bajada extraordinaria? Sustenta tu respuesta en términos de "conservación del agua". (Si agitas el agua en una tina para que en un extremo tenga más profundidad, ¿el otro extremo tendrá menos profundidad?)
41. El Mar Mediterráneo tiene muy poco sedimento arrastrado y suspendido en sus aguas; principalmente se debe a que no hay mareas apreciables. ¿Por qué supones que en el Mar Mediterráneo prácticamente no hay mareas? De igual modo, ¿hay mareas en el Mar Negro? ¿Y en el Gran Lago Salado? ¿Y en una cisterna de abastecimiento de agua? ¿En un vaso de agua? Explica por qué.
42. El cuerpo humano está formado principalmente por agua. ¿Por qué cuando la Luna pasa arriba causa mareas biológicas bastante menores en ti, que en un melón de 1 kg que esté sobre tu cabeza?
43. Si no existiera la Luna, ¿seguiría habiendo mareas? En caso afirmativo, ¿con qué frecuencia?
44. ¿Qué efecto tendría sobre las mareas terrestres que el diámetro de la Tierra fuera mucho mayor que el actual? ¿Si la Tierra fuera como es, pero la Luna fuera mucho mayor y tuviera la misma masa que tiene?
45. La máxima fuerza de marea en nuestros organismos se debe a ¿la Tierra, la Luna o al Sol?

Problemas

46. Exactamente por qué suceden las mareas en la corteza terrestre y en la atmósfera terrestre?
47. El valor de g en la superficie de la Tierra es aproximadamente 9.8 m/s^2 . ¿Cuál será el valor de g a una distancia igual a dos veces el radio de la Tierra?
48. Si la Tierra tuviera densidad uniforme (igual valor de masa/ volumen en todos sus puntos), ¿cuál sería el valor de g dentro de la Tierra, a la mitad de su radio?
49. Si la Tierra tuviera densidad uniforme, ¿aumentaría o disminuiría tu peso en el fondo de un profundo pozo minero? Sustenta tu respuesta.
50. Sucede que hay un aumento de peso hasta en los pozos mineros más profundos. ¿Qué nos dice esto acerca de los cambios de densidad en la Tierra, en función de la profundidad?
51. ¿Qué necesita más combustible, un cohete que va de la Tierra a la Luna, o uno que regresa de la Luna a la Tierra? ¿Por qué?
52. Si de alguna forma pudieras hacer un túnel en el interior de una estrella, ¿tu peso aumentaría o disminuiría en su interior? Si en vez de eso estuvieras de pie en la superficie de una estrella que se contrae, ¿tu peso aumentaría o disminuiría? ¿Por qué tus respuestas son diferentes?
53. Si nuestro Sol contrajera su tamaño y se transformara en un agujero negro, demuestra, con la ecuación de la fuerza gravitacional, que la órbita de la Tierra no se afectaría.
54. Si la Tierra fuera hueca, pero tuviera la misma masa y el mismo radio, ¿aumentaría tu peso en tu lugar actual, disminuiría o sería igual que ahora? Explica por qué.
55. Algunas personas rechazan la validez de las teorías científicas diciendo que "sólo" son teorías. La ley de la gravitación universal es una teoría. ¿Quiere decir eso que los científicos dudan todavía de su validez? Explica por qué.
56. En la página 174 dijimos que no se puede obstruir la gravedad y, en la misma página, señalamos que los componentes gravitacionales se anulan dentro de un cascarón uniforme. ¿Por qué no se contradicen estas dos afirmaciones?
57. Estrictamente hablando, pesas un poco menos cuando estás en el vestíbulo de un rascacielos masivo que cuando estás en tu casa. ¿Por qué?
58. Una persona que cayera en un agujero negro probablemente moriría a causa de las fuerzas de marea antes ser tragado por el agujero. Explica cómo.
59. Una nave espacial cerca de una estrella que se encoge ve cómo ésta colapsa, hasta convertirse en un agujero negro. ¿Habría cambio en el campo gravitacional en la posición de la nave. Sustenta tu respuesta.
60. Redacta dos preguntas de opción múltiple: Una que evalúe el conocimiento de uno de tus compañeros sobre la ley del inverso del cuadrado, y otra para comprobar si es capaz de distinguir entre peso e ingravidez.

1. Calcula el cambio de la fuerza de gravedad entre dos planetas, cuando disminuye la distancia entre ellos en un factor de cinco.
2. El valor de g en la superficie terrestre es aproximadamente 9.8 m/s^2 . ¿Cuál será el valor de g a una distancia al centro de la Tierra que sea igual a cuatro veces el radio terrestre?
3. Demuestra, con razonamiento algebraico, que tu aceleración gravitacional hacia un objeto de masa M que está a la distancia d es $a = GM/d^2$ y, en consecuencia, no depende de tu masa.
4. La masa de una estrella de neutrones es $3.0 \times 10^{30} \text{ kg}$ (1.5 masas solares), y su radio es $8,000 \text{ m}$ (8 km). ¿Cuál es la aceleración de la gravedad en la superficie de esta estrella condensada, ya consumida?
5. Muchas personas creen en forma errónea que los astronautas en órbita en torno a la Tierra están "arriba de la gravedad". Calcula g en los dominios del transbordador espacial, a 200 kilómetros sobre la superficie terrestre. La masa de la Tierra es $6 \times 10^{24} \text{ kg}$, y su radio es $6.38 \times 10^6 \text{ m}$ (6380 km). ¿Tu resultado sería qué porcentaje es de 9.8 m/s^2 ?

Transbordador espacial en órbita
(más alejado del centro de la Tierra)



6. La diferencia en fuerza por masa (N/kg) a través de un cuerpo, que es la fuerza de marea T_F , se calcula en forma aproximada con $T_F = 4GMR/d^3$, donde G es la constante gravitacional, M es la masa del cuerpo que causa las mareas, R es el radio del cuerpo que tiene las mareas y d es la distancia entre los centros de los cuerpos. Calcula dos cuestiones: a) T_F que la Luna ejerce sobre ti, y b) T_F que un melón de 1 kg ejerce sobre ti si está a 1 m arriba de tu cabeza. Para simplificar supón que tu radio R es 1 m (imagina que tienes 2 m de estatura). Que la distancia d a la Luna igual a $3.8 \times 10^8 \text{ m}$, y que d al melón es 2 m . La masa M de la Luna es $7.3 \times 10^{22} \text{ kg}$. c) Después de realizar los cálculos, compara tus resultados. ¿Qué marea es mayor y cuántas veces? A continuación, comparte esta información con tus amigos que digan que las fuerzas de marea de los planetas influyen sobre las vidas de las personas.

Movimiento de proyectiles y de satélites



Chuck Stone pide a su grupo que prediga el alcance del proyectil.

THE Physics Place

Movimiento de proyectiles

THE Physics Place

Movimiento orbital y leyes de Kepler

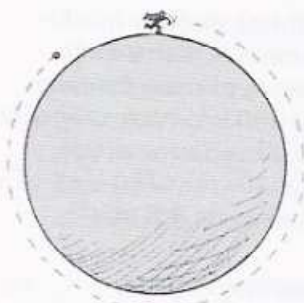


FIGURA 10.1

Si Superman lanzara una piedra con la rapidez suficiente, ésta describiría una órbita en torno a la Tierra, si no hubiera resistencia del aire.

Desde la cima del Mauna Kea, un volcán dormido en Hawai (o desde cualquier punto de observación elevado, desde donde se vea el lejano horizonte del mar con nitidez y claridad), podrás ver la curvatura de la Tierra. Debes sostener una regla frente a tus ojos en la línea donde se encuentran el cielo y el mar. De otro modo no podrías decir si lo que ves es tan sólo una ilusión. Alinea tu visual de tal manera que la unión entre el cielo y el mar apenas toque la parte media del filo inferior de tu regla; y apreciarás que hay un espacio entre el cielo y el mar en los extremos. Estás viendo la curvatura de la Tierra. Ahora, arroja una piedra horizontalmente, hacia el horizonte. Caerá con rapidez al suelo, frente a ti después de algunos metros. Su movimiento se curva al caer. Notarás que mientras lances la piedra con más rapidez, la curva que describe será más amplia. Ahora imagina lo rápido que debería lanzarla Superman para que llegara más allá del horizonte. Y lo rápido que debe arrojarla para que su trayectoria curva coincida con la curvatura de la Tierra. Porque si lo pudiera hacer, y de alguna forma se eliminara la resistencia del aire, la piedra seguiría una trayectoria curva alrededor de la Tierra y se transformaría en un satélite de ésta. Después de todo, un satélite no es más que un proyectil que se mueve con la rapidez suficiente como para ir a parar en forma continua más allá del horizonte en su caída.

Movimiento de proyectiles

Si no hubiera gravedad podrías lanzar una roca hacia el cielo, y seguiría una trayectoria recta. Sin embargo, debido a la gravedad, la trayectoria describe una curva. Una roca que se arroja, una bala de cañón o cualquier objeto que se lanza por cualquier método y continúa moviéndose por su propia inercia se llama **proyectil**. A los artilleros de la Antigüedad, las trayectorias curvas de los proyectiles les parecían muy complicadas. Hoy sabemos que esas trayectorias son sorprendentemente sencillas, cuando examinamos por separado los componentes horizontal y vertical de la velocidad.

El componente horizontal de la velocidad para un proyectil no es más complicada que la velocidad horizontal de una bola de bolos que rueda libremente por una pista horizontal. Si se pudiera ignorar el efecto retardante de la fricción, no habría fuerza horizontal sobre la bola y su velocidad sería constante. Rueda por su propia inercia y recorre distancias iguales en intervalos de tiempo iguales (figura 10.2). El componente horizontal del movimiento de un proyectil es justo como el movimiento de la bola de bolos en la pista.

El componente vertical del movimiento de un proyectil que sigue una trayectoria curva no es más que el movimiento que describimos en el capítulo 3, para

THE Physics Place

Movimiento de proyectiles
Mas movimiento
de proyectiles



FIGURA 10.2

(Arriba) Si una esfera rueda por una superficie horizontal, su velocidad es constante porque no hay componente de la fuerza gravitacional que actúe horizontalmente. (Izquierda) Déjala caer y acelera hacia abajo, cubriendo mayores distancias verticales cada segundo.

un objeto en caída libre. El componente vertical es exactamente igual a la de un objeto que cae libre hacia abajo, como se ve a la izquierda, en la figura 10.2. Cuanto más rápidamente caiga el objeto, será mayor la distancia recorrida en cada segundo sucesivo. O bien, si lo lanzamos hacia arriba, las distancias verticales del recorrido disminuyen al avanzar el tiempo de ascenso.

La trayectoria curva de un proyectil es una combinación de sus movimientos horizontal y vertical. El componente horizontal de la velocidad para un proyectil es completamente independiente de la componente vertical de la velocidad, cuando la resistencia del aire es tan pequeña que se ignora. Entonces, al componente horizontal constante de la velocidad no le afecta la fuerza de gravedad vertical. Cada componente es independiente. Sus efectos combinados producen la trayectoria de los proyectiles.

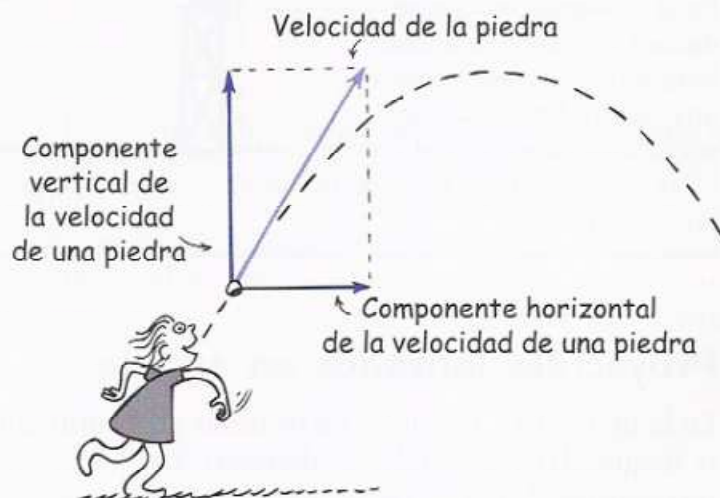
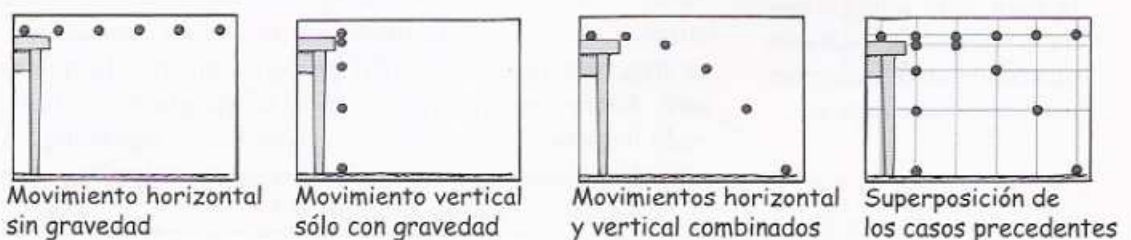


FIGURA 10.3

Componentes vertical y horizontal de la velocidad de una piedra.

Proyectiles disparados horizontalmente

El movimiento de un proyectil, o movimiento balístico, se analiza muy bien en la figura 10.4, que muestra una imagen múltiple simulada de una pelota que rueda y cae de la orilla de una mesa. Examínala con cuidado, porque contiene mucha física excelente. A la izquierda se ven las posiciones sucesivas a intervalos de tiempo



Movimiento horizontal
sin gravedad

Movimiento vertical
sólo con gravedad

Movimientos horizontal
y vertical combinados

Superposición de
los casos precedentes

FIGURA 10.4

Figura interactiva
Imágenes simuladas de una
pelota en movimiento
iluminada con luz estroboscópica.

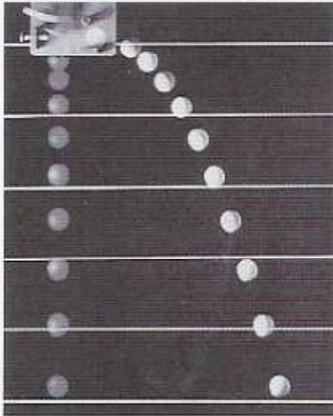


FIGURA 10.5

Figura interactiva

Fotografía estroboscópica de dos pelotas de golf dejadas caer en forma simultánea de un mecanismo que permite que una pelota caiga libremente mientras que la otra es lanzada horizontalmente.

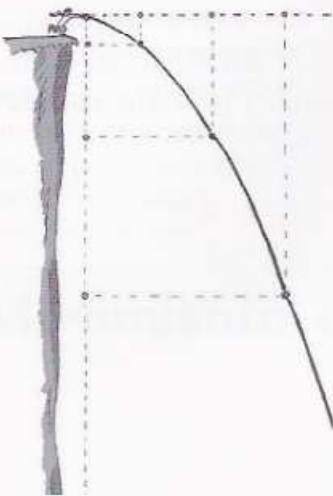


FIGURA 10.6

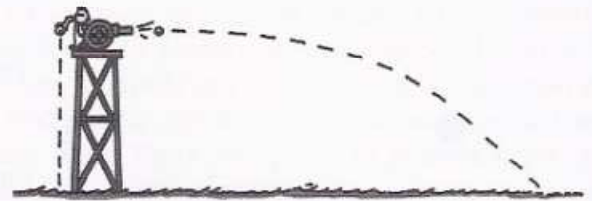
La línea punteada vertical es la trayectoria de una piedra que se suelta desde el reposo. La línea punteada horizontal sería su trayectoria si no hubiera gravedad. La línea curva sólida muestra la trayectoria resultante que combina los movimientos horizontal y vertical.

iguales, de la pelota sin el efecto de la gravedad. Sólo se muestra el componente horizontal del movimiento de la pelota. A continuación vemos el movimiento vertical sin un componente horizontal. La trayectoria curva de la tercera parte se analiza mejor considerando por separado los componentes horizontal y vertical del movimiento. Se notan dos cuestiones importantes. La primera es que el componente horizontal de la velocidad de la pelota no cambia conforme avanza la pelota que cae. Esa pelota recorre la misma distancia horizontal en intervalos de tiempo iguales entre cada destello. Esto se debe a que no hay componente de la fuerza gravitacional que actúe en dirección horizontal. La gravedad actúa sólo *hacia abajo*, por lo que la única aceleración de la pelota es *hacia abajo*. Lo segundo que se debe observar es que las posiciones verticales se alejan entre sí al transcurrir el tiempo. Las distancias verticales recorridas son las mismas que si tan sólo se dejara caer la pelota. Observa que la curvatura de la trayectoria de la pelota es la combinación del movimiento horizontal, que permanece constante, y el movimiento vertical, que tiene la aceleración debida a la gravedad.

La trayectoria de un proyectil que acelera sólo en dirección vertical y que al mismo tiempo se mueve en dirección horizontal con velocidad constante es una **parábola**. Cuando la resistencia del aire es lo suficientemente pequeña como para no tenerla en cuenta, como en el caso de un objeto pesado que no adquiere gran rapidez, la trayectoria es parabólica.

EXAMÍNA TE

En el momento en que se dispara un cañón apuntado horizontalmente en medio de una llanura horizontal, se suelta otra bala junto al cañón y cae al suelo. ¿Cuál bala, la disparada o la que se dejó caer desde el reposo, llegará primero al suelo?



Proyectiles lanzados en ángulo

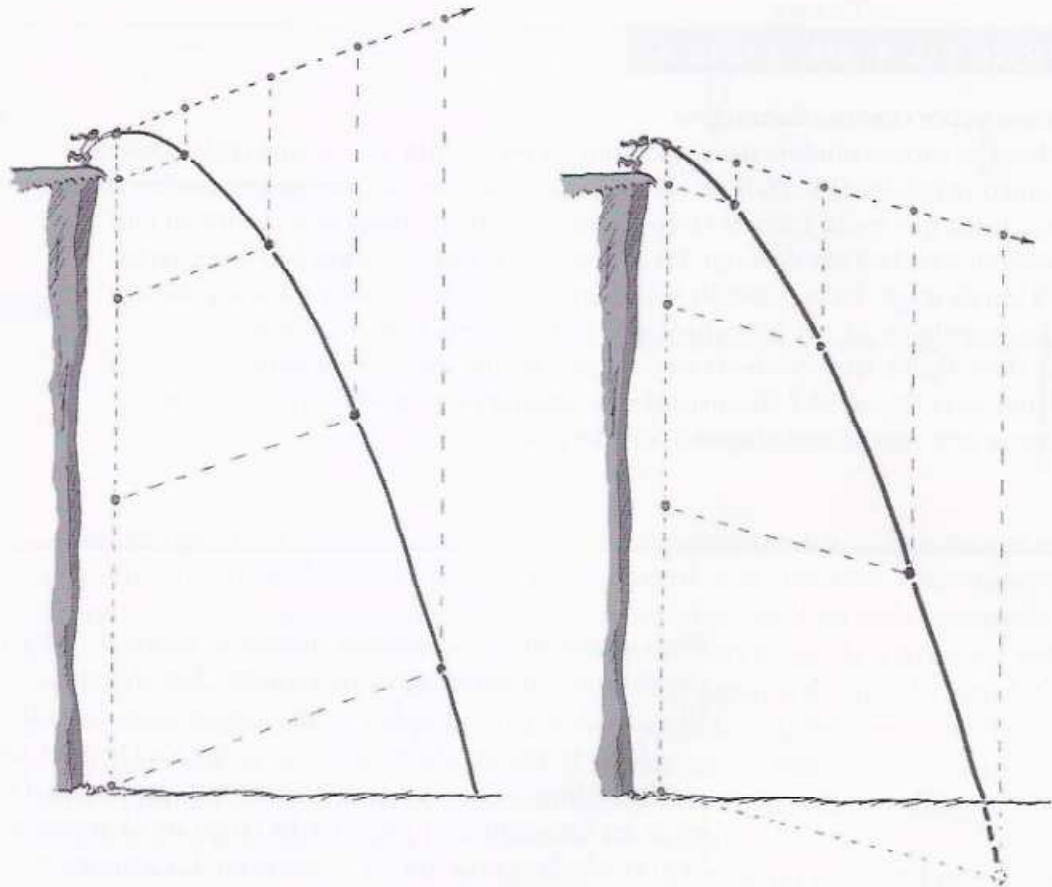
En la figura 10.7 se ven las trayectorias de piedras lanzadas en ángulos ascendente (izquierda) y descendente (derecha). Las líneas rectas punteadas muestran las trayectorias ideales de las piedras si no hubiera gravedad. Observa que la distancia vertical bajo las trayectorias rectilíneas idealizadas es la misma para tiempos iguales. Esta distancia vertical es independiente de lo que ocurre horizontalmente.

COMPRUEBA TU RESPUESTA

Las dos balas llegan al suelo al mismo tiempo, pues ambas caen *la misma distancia vertical*. ¿Puedes ver que esto es consistente con nuestro análisis de las figuras 10.4 a 10.6? Podemos deducirlo de otra forma, preguntando cuál bala llegaría primero al suelo si el cañón se apuntara en un ángulo *hacia arriba*. En este caso, la bala que sólo se deja caer llegaría al suelo primero, mientras la que se dispara aún estaría en el aire. Ahora imagina que el cañón se apunta *hacia abajo*. En este caso, la bala disparada llegaría al suelo primero. Debe haber algún ángulo en el cual haya un empate, cuando ambas llegan al suelo al mismo tiempo. ¿Te das cuenta que sería cuando el cañón se apunta horizontalmente?

FIGURA 10.7

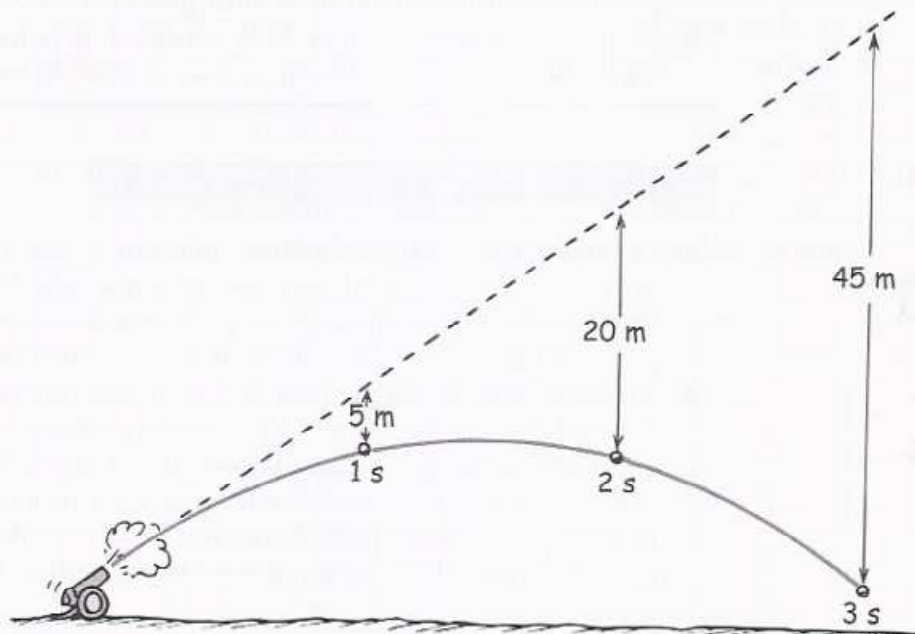
Ya sea que se lance en un ángulo ascendente o descendente, la distancia vertical de caída bajo la trayectoria recta idealizada es la misma para tiempos iguales.



La figura 10.8 muestra las distancias verticales específicas para una bala de cañón disparada con un ángulo hacia arriba. Si no hubiera gravedad, la bala seguiría la trayectoria rectilínea que indica la línea punteada. Pero sí hay gravedad y no sucede lo anterior. Lo que ocurre en realidad es que la bala cae en forma continua, abajo de la línea imaginaria, hasta que acaba llegando al suelo. Observa que la distancia vertical que cae por debajo de cualquier punto de la

FIGURA 10.8

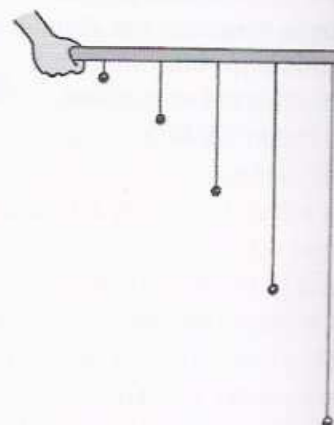
Si no hubiera gravedad, el proyectil seguiría una trayectoria rectilínea (línea punteada). Sin embargo, debido a la gravedad, el proyectil cae bajo esa línea a la misma distancia vertical que caería si se dejara caer desde el reposo. Compara las distancias caídas con las que se ven en la tabla 3.3 del capítulo 3. (Con $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ esas distancias son, con mayor exactitud, 4.9 m, 19.6 m y 44.1 m.)



PRÁCTICA DE FÍSICA

Manos sobre cuentas danzarinas

Elabora tu propio modelo de trayectorias de proyectiles. Divide una regla o barra en cinco partes iguales. En la posición 1, como se muestra, cuelga una cuenta en una cuerda que mida 1 cm de largo. En la posición 2, cuelga una cuenta en una cuerda que mida 4 cm de largo. En la posición 3, haz lo mismo con una cuerda de 9 cm de largo. En la posición 4, usa una cuerda de 16 cm, y para la posición 5, usa cuerda de 25 cm. Si sostienes horizontalmente la barra, tendrás una versión de la figura 10.6. Sostenla en un ligero ángulo ascendente para mostrar una versión de la figura 10.7 (izquierda). Sostenla en un ángulo descendente para mostrar una versión de la figura 10.7 (derecha).



línea punteada es la misma distancia vertical que caería si partiera del reposo y cayera en el mismo lapso de tiempo. Esa distancia, como se explicó en el capítulo 3, es $d = \frac{1}{2}gt^2$, donde t es el tiempo transcurrido.

Esto se puede plantear de otro modo: Dispara un proyectil hacia el cielo, con cierta inclinación e imagina que no hay gravedad. Después de t segundos debería estar en determinado punto a lo largo de la trayectoria rectilínea. Pero debido a la gravedad no está ahí. ¿Dónde está? La respuesta es que está directamente abajo de ese punto. ¿Qué tan abajo? La respuesta en metros es $5t^2$ (o con más exactitud, $4.9t^2$). ¿Qué te parece?

En la figura 10.8 y las anteriores quizá veas otra cosa: La bala recorre distancias horizontales iguales en intervalos de tiempo iguales. Eso se debe a que no hay aceleración horizontal. La única aceleración es vertical, con la dirección de la gravedad terrestre.

EXAMÍNATE

1. Imagina que la bala de cañón de la figura 10.8 se disparara con mayor rapidez. ¿A cuántos metros abajo de la línea punteada estaría al final de los 5 s?
2. Si el componente horizontal de la velocidad de la bala fuera 20 m/s, ¿hasta dónde llegaría horizontalmente la bala al final de los 5 s?

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. La distancia vertical bajo la línea punteada al final de 5 s es 125 m [$d = 5t^2 = 5(5)^2 = 5(25) = 125$ m]. Es interesante que esta distancia no depende del ángulo del cañón. Si no se toma en cuenta la resistencia del aire, cualquier proyectil caería $5t^2$ metros abajo de donde habría llegado sin gravedad.
2. Sin resistencia del aire, la bala de cañón recorrerá una distancia horizontal de 100 m [$d = \bar{v}t = (20 \text{ m/s})(5 \text{ s}) = 100$ m]. Observa que como la gravedad sólo actúa verticalmente y no hay aceleración en dirección horizontal, la bala de cañón viaja distancias horizontales iguales en tiempos iguales. Esta distancia no es más que su componente horizontal de la velocidad multiplicado por el tiempo (y no $5t^2$, que sólo se aplica al movimiento vertical bajo la aceleración de la gravedad).

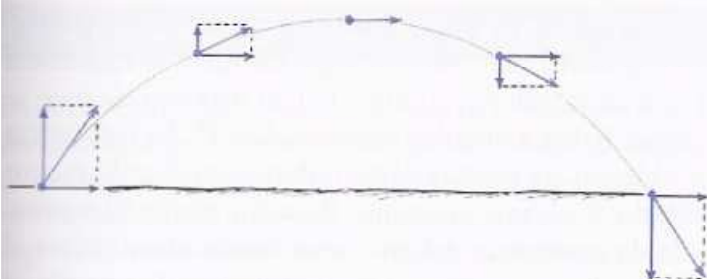


FIGURA 10.9

Figura interactiva

Velocidad de un proyectil en varios puntos de su trayectoria. Observa que el componente vertical cambia, y el componente horizontal siempre es el mismo.

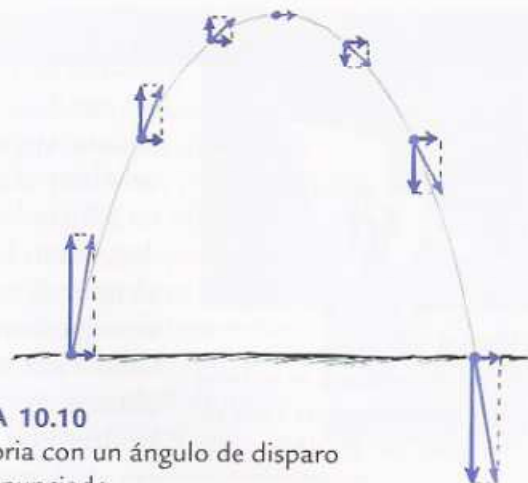


FIGURA 10.10

Trayectoria con un ángulo de disparo más pronunciado.

En la figura 10.9 vemos los vectores que representan los componentes vertical y horizontal de la velocidad de un proyectil que describe una trayectoria parabólica. Observa que el componente horizontal es igual en todas partes, y que sólo cambia el componente vertical. También observa que la velocidad real se representa con el vector que forma la diagonal del rectángulo que definen los vectores componentes. En la cúspide de la trayectoria el componente vertical es cero, por lo que ahí la velocidad sólo tiene el componente horizontal. En todos los demás puntos, la magnitud de la velocidad es mayor (porque la diagonal de un rectángulo es más larga que cualquiera de sus lados).

La figura 10.10 muestra la trayectoria que describe un proyectil que se dispara con la misma rapidez, pero en un ángulo más inclinado. Observa que el vector de velocidad inicial tiene un componente vertical mayor que cuando el ángulo de disparo es menor. Este componente mayor da como resultado una trayectoria que alcanza una altura mayor. Pero el componente horizontal es menor y el alcance también es menor.

En la figura 10.11 se ven las trayectorias de varios proyectiles, todos con la misma rapidez inicial, pero con diferentes ángulos de tiro. En esta figura no se tienen en cuenta los efectos de la resistencia del aire, de manera que todas las trayectorias describen parábolas. Observa que esos proyectiles alcanzan distintas alturas sobre el piso. También tienen distintos alcances horizontales, o distancias recorridas horizontalmente. Lo notable que se nota en la figura 10.11 es que ¡se obtiene el mismo alcance desde dos ángulos de disparo distintos, cuando esos ángulos suman 90 grados! Por ejemplo, un objeto que se lanza al aire en un ángulo de 60 grados tiene el mismo alcance que si se lanzara con la misma rapidez en un ángulo de 30 grados. Desde luego, cuando el ángulo es menor, el objeto estará en el aire un menor tiempo. La distancia máxima se obtiene cuando el ángulo de tiro es 45°, y cuando la resistencia del aire es despreciable.

FIGURA 10.11

Figura interactiva

Alcances de un proyectil disparado con la misma rapidez a distintos ángulos de tiro.

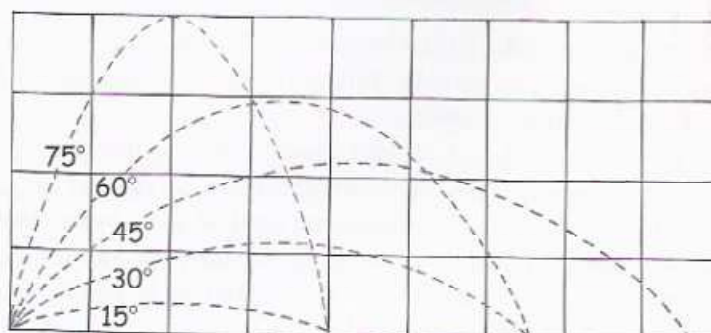




FIGURA 10.12

El alcance máximo se obtiene cuando se batea una bola en un ángulo de casi 45° .

Sin la resistencia del aire, una pelota de béisbol tendría un alcance máximo cuando fuera bateada a 45° sobre la horizontal. Sin embargo, debido a la resistencia del aire y al ascenso debido al giro de la pelota (capítulo 14), el máximo alcance se obtiene cuando perceptiblemente se batea a ángulos menores de 45° . La resistencia del aire y el giro son más apreciables en las pelotas de golf, donde un ángulo menor de 38 grados daría como resultado el alcance máximo. Para los proyectiles pesados, como las jabalinas y la bala, la resistencia del aire tiene menos efecto sobre el alcance. Como una jabalina es pesada y presenta un corte transversal pequeño al aire que corta, describe una parábola casi perfecta cuando se lanza. También una bala. Para esos proyectiles el alcance máximo a igual rapidez de lanzamiento se obtiene con un ángulo de lanzamiento aproximado de 45° (un poco menor, porque la altura de lanzamiento queda arriba del nivel de terreno). ¡Ajá!, pero las rapidez de lanzamiento *no* son iguales en esos proyectiles disparados con distintos ángulos. Al lanzar una jabalina o al disparar una bala, una parte apreciable de la fuerza de lanzamiento se ocupa de combatir la gravedad: cuanto mayor sea el ángulo, menor rapidez tendrá al salir de la mano de quien la lanza. Entonces, la gravedad juega su papel antes y después del lanzamiento. Puedes hacer la prueba: lanza horizontalmente una piedra pesada, y después verticalmente; verás que el lanzamiento horizontal es bastante más rápido que el vertical. Así, el alcance máximo con proyectiles pesados lanzados por seres humanos se alcanza con un ángulo menor de 45 grados; pero no es por la resistencia del aire.

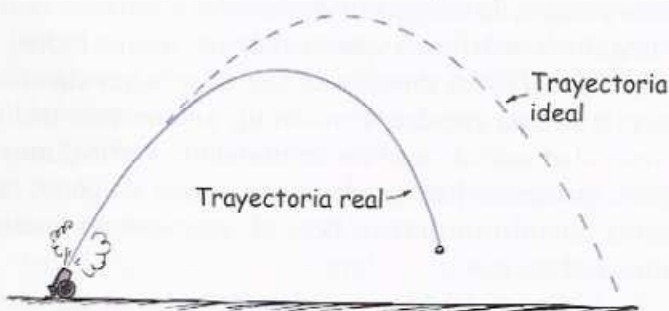


FIGURA 10.13

Figura interactiva

Con la resistencia del aire, la trayectoria de un proyectil con alta rapidez es más corta que la trayectoria parabólica ideal.

EXAMÍNA TE

1. Una pelota de béisbol es bateada con cierto ángulo. Una vez en el aire, y despreciando la resistencia del aire, ¿cuál será la aceleración vertical de la bola? ¿La aceleración horizontal?
2. ¿En qué parte de su trayectoria la pelota de béisbol tiene una rapidez mínima?
3. Una bola de béisbol es bateada y sigue una trayectoria parabólica, un día en que el Sol está directamente arriba. ¿Cómo se compara la rapidez de la sombra de la bola sobre el campo con el componente horizontal de su velocidad?

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. La aceleración vertical es g , porque la fuerza de la gravedad es vertical. La aceleración horizontal es cero, porque no hay fuerza horizontal que actúe sobre la pelota.
2. La rapidez mínima de una pelota se presenta en la cúspide de su trayectoria. Si se lanza verticalmente, su rapidez en la cúspide será cero. Si se lanza inclinada, el componente vertical de la velocidad será cero en la cumbre y sólo quedará el componente horizontal. Así, la rapidez en la cumbre es igual al componente horizontal de la velocidad de la pelota en cualquier punto. ¿No te parece estupendo?
3. ¡Son iguales!

REVISANDO AL TIEMPO EN EL AIRE

En el capítulo 3 vimos que el tiempo en el aire durante un salto es independiente de la rapidez horizontal. Ahora veremos por qué es así: los componentes horizontal y vertical del movimiento son independientes entre sí. Las reglas del movimiento de proyectiles se aplican también a los saltos. Una vez que los pies se despegan del suelo, sólo actúa la fuerza de la gravedad sobre quien salta (sin tener en cuenta la resistencia del aire). El tiempo en el aire sólo depende del componente vertical, de la velocidad de despegue. No obstante, sucede que el hecho de

correr puede marcar la diferencia. La fuerza de despegue se puede aumentar algo por la acción de correr, por lo que el tiempo en el aire para un salto con carrera suele ser mayor tiempo que el correspondiente para un salto parado. Pero una vez que los pies del corredor se despegan del suelo sólo el componente vertical de la velocidad de despegue determina el tiempo en el aire.

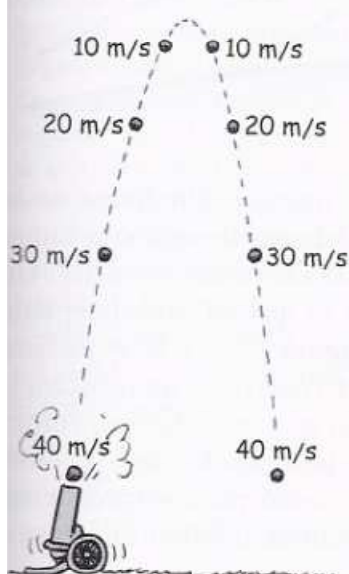


FIGURA 10.14
Sin resistencia del aire, la rapidez que se pierde al subir es igual a la rapidez que se gana al bajar; el tiempo de subida es igual al tiempo de bajada.

Cuando la resistencia del aire es suficientemente pequeña como para no tenerla en cuenta, un proyectil subirá hasta la altura máxima en el mismo tiempo que tarda en caer desde esa altura hasta su nivel inicial (figura 10.14). Esto se debe a que la desaceleración debida a la gravedad es igual cuando sube que la aceleración debida a la gravedad cuando baja. La rapidez que pierde al subir es, en consecuencia, igual que la rapidez que gana al bajar. Así, el proyectil llega al piso con la misma rapidez que tenía al ser disparado.

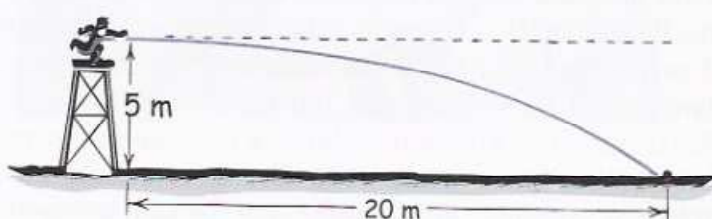


FIGURA 10.15

¿Con qué rapidez se lanza la pelota?

EXAMÍNAME

El niño de la torre lanza una pelota, y alcanza 20 m horizontalmente, como se observa en la figura 10.15. ¿Cuál será su rapidez de lanzamiento?

Los juegos de béisbol se hacen en terreno horizontal. Para el movimiento de proyectiles de corto alcance como el campo de juego, se puede considerar que la Tierra es plana, ya que el vuelo de la pelota no se ve afectado por la curvatura de la Tierra. Sin embargo, para los proyectiles de muy largo alcance, se debe tener en cuenta la curvatura de la Tierra. Veremos ahora que si un objeto se dispara con suficiente rapidez, caerá siempre en torno a la Tierra y se transformará en su satélite.

COMPRUEBA TU RESPUESTA

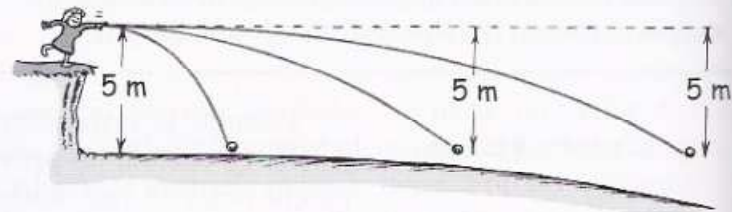
La pelota se lanza horizontalmente, por lo que la rapidez de lanzamiento es la distancia horizontal dividida entre el tiempo. El dato es una distancia horizontal de 20 m, pero no se especifica el tiempo. Sin embargo, puedes calcularlo, porque sabes que la distancia vertical que cae la pelota es 5 m, ¡que requieren de 1 s! Según la ecuación para la velocidad constante (que se aplica al movimiento horizontal), $v = d/t = (20 \text{ m})/(1 \text{ s}) = 20 \text{ m/s}$. Es interesante hacer notar que la ecuación de la rapidez constante, $v = d/t$ guía el razonamiento acerca del factor crucial en este problema: el tiempo.

Proyectiles con movimiento rápido: satélites

Observa al pitcher en la torre de la figura 10.15. Si no actuara la gravedad sobre la pelota, ésta seguiría una trayectoria rectilínea que muestra la línea punteada. Pero sí hay gravedad, así que la pelota cae por debajo de esta trayectoria rectilínea. De hecho, como se describió anteriormente, 1 segundo después de que la bola sale de la mano del pitcher habrá caído 5 metros de altura, abajo de la línea punteada, sea cual fuere la rapidez del lanzamiento. Es importante entender esto, porque es el fundamento del movimiento de los satélites.

FIGURA 10.16

Si lanzas una piedra con cualquier rapidez, después de un segundo habrá caído 5 m abajo de donde hubiera estado si no hubiera gravedad.



La curvatura de la Tierra desciende 5 m por cada 8 km de tangente, lo cual significa que si navegas en un océano tranquilo, sólo podrás ver la punta del mástil de 5 m de un barco que está a 8 km.

¡EUREKA!

Un satélite terrestre es simplemente un proyectil que cae *alrededor* de la Tierra, en vez de caer *hacia* ella. La rapidez del satélite debe ser la suficiente como para asegurar que su distancia de caída coincida con la curvatura terrestre. Un hecho geométrico respecto a la curvatura de la Tierra es que su superficie baja 5 metros cada 8,000 metros tangentes a la superficie (figura 10.17). Si se pudiera lanzar una bola de béisbol tan rápido como para que recorriera una distancia horizontal de 8 kilómetros durante el segundo que tarda en caer 5 metros, entonces seguiría la curvatura de la Tierra. Es decir, tendría una rapidez de 8 kilómetros por segundo. Si te parece que no es una rapidez como para sorprenderse, conviértela a kilómetros por hora: son unos impresionantes ¡29,000 kilómetros por hora (o 18,000 millas por hora)!

FIGURA 10.17

Curvatura de la Tierra. ¡No está a escala!

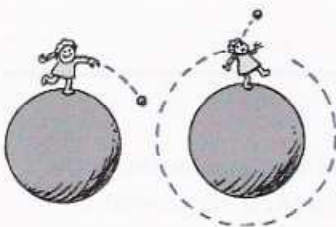


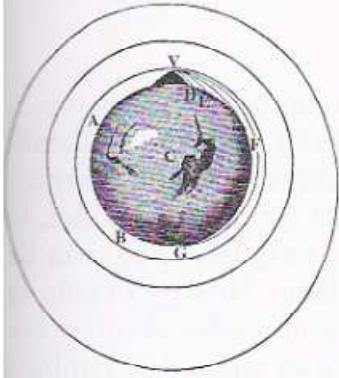
Con esta rapidez, la fricción de la atmósfera quemaría la pelota de béisbol, y hasta un trozo de hierro. Es el destino de los trozos de roca y demás meteoritos que entran a la atmósfera terrestre y se queman, viéndose como "estrellas fugaces". Es la razón por la que los satélites o los transbordadores espaciales se lanzan a altitudes de 150 kilómetros o más, para estar arriba de casi toda la atmósfera, para que casi no tengan resistencia del aire. Una idea equivocada común es que los satélites que giran a grandes altitudes están libres de la gravedad. Nada puede ser más erróneo. La fuerza de la gravedad sobre un satélite a 200 kilómetros sobre la superficie terrestre es casi tanta como al nivel del mar. La gran altitud es para que el satélite salga de la atmósfera terrestre, donde la resistencia del aire casi no existe; pero no para colocarlo más allá de la gravedad terrestre.

Isaac Newton comprendió el movimiento de los satélites, y dedujo que la Luna no es más que un proyectil que describe círculos en torno a la Tierra bajo la atracción de la gravedad. Este concepto se ve en uno de sus dibujos (figura 10.19). Newton comparó el movimiento de la Luna con una bala de cañón disparada desde la cumbre de una alta montaña. Imaginó que esa cumbre estuviera sobre la atmósfera terrestre, para que la resistencia del aire no impidiera el movi-

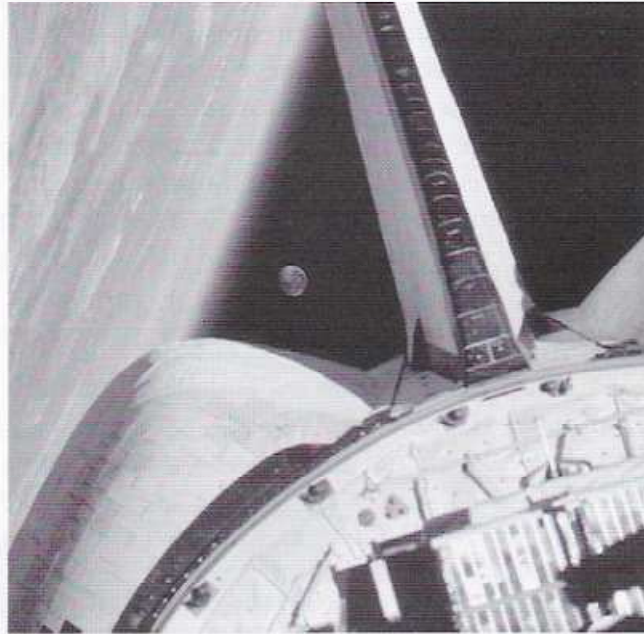
FIGURA 10.18

Si la rapidez de la piedra y la curvatura de su trayectoria fuera lo suficientemente grande, la piedra se transformaría en satélite.



**FIGURA 10.19**

“Cuanto mayor sea la velocidad con la que se lanza (una piedra), más lejos llegará al caer al suelo. En consecuencia podremos suponer que si la velocidad se aumenta, describiría un arco de 1, 2, 5, 10, 100, 1,000 millas para llegar a la Tierra hasta que, por último, rebasando los límites terrestres, iría al espacio sin tocarla.” —Isaac Newton, *El sistema del mundo*.

**FIGURA 10.20**

El transbordador espacial es un proyectil en constante estado de caída libre. Debido a su velocidad tangencial, cae alrededor de la Tierra, en vez de caer a ella verticalmente.

Tanto la bala de cañón como la Luna tienen velocidad tangencial (paralela a la superficie terrestre) suficiente como para asegurar que su movimiento sea *alrededor* de la Tierra, y no *hacia* la Tierra. Si no hay resistencia que reduzca su rapidez, la Luna, o cualquier satélite terrestre “cae” girando alrededor de la Tierra en forma indefinida. Asimismo, los planetas caen continuamente alrededor del Sol, en trayectorias cerradas. ¿Por qué los planetas no chocan contra el Sol? No lo hacen porque tienen velocidades tangenciales. ¿Qué sucedería si sus velocidades tangenciales se redujeran a cero? La respuesta es bastante sencilla: Caerían directo hacia el Sol y, entonces sí, desde hace mucho habrían chocado contra él. Lo que queda es la armonía que observamos.

EXAMÍNA TE

Una de las cosas bellas que tiene la física es que en general hay distintas formas de considerar y explicar determinado fenómeno. ¿Es válida la siguiente explicación? Los satélites permanecen en órbita en vez de caer a la Tierra porque están más allá de la principal atracción de la gravedad de la Tierra.

COMPRUEBA TU RESPUESTA

No, no, ¡mil veces no! Si algún objeto en movimiento estuviera más allá de la atracción gravitatoria se movería en una línea recta y no se curvaría en torno a la Tierra. Los satélites permanecen en órbita porque están *siendo atraídos* por la gravedad, no porque estén fuera de su alcance. Para las altitudes de la mayoría de los satélites terrestres, el campo gravitacional de la Tierra es tan sólo escasos puntos porcentuales menor que en la superficie terrestre.

Órbitas circulares de satélites

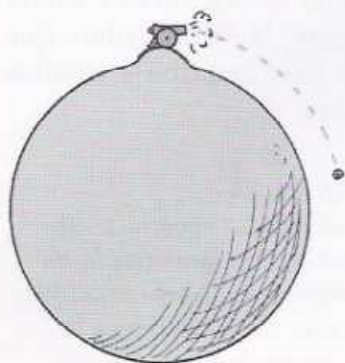


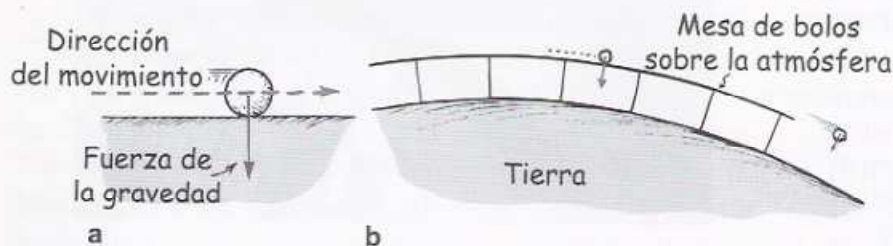
FIGURA 10.21

Figura interactiva

Si se disparara con la suficiente rapidez, la bala entraría en órbita.

FIGURA 10.22

a) La fuerza de la gravedad sobre la mesa de bolos está a 90° respecto a su dirección de movimiento, por lo que no tiene el componente de fuerza que tire de la bola hacia adelante o hacia atrás, y ésta rueda con rapidez constante. b) Lo mismo sucedería si la mesa fuera muy larga y estuviera "nivelada" con la curvatura de la Tierra.



Imagina una mesa de bolos que rodee por completo a la Tierra, con una altura suficiente como para estar arriba de la atmósfera y de la resistencia del aire. La bola rodará con rapidez constante sobre la pista. Si se corta y se quita una parte de la pista, la bola caerá por su extremo y llegará al suelo. Una bola más rápida que encuentre el hueco llegará al suelo más lejos, más adelante del hueco. ¿Hay alguna rapidez con la cual la bola salvaría el hueco (como un motociclista que sube por una rampa y salva una distancia para llegar a una rampa del otro lado). La respuesta es sí: a 8 kilómetros por segundo salvará ese hueco, y cualquier hueco, aunque sea de 360° . Estaría en órbita circular.

Ten en cuenta que un satélite en órbita circular se mueve siempre en dirección perpendicular a la fuerza de la gravedad que actúa sobre él. El satélite no se mueve en dirección de la fuerza, lo cual aumentaría su rapidez; ni se mueve en dirección contraria a la fuerza, lo cual disminuiría su rapidez. En vez de ello, se mueve en ángulo recto con la fuerza de gravitación que actúa sobre él. No hay cambio de rapidez; sólo hay cambio de dirección. Vemos así por qué un satélite en órbita circular viaja paralelo a la superficie de la Tierra con rapidez constante; es una forma muy especial de la caída libre.

Para un satélite cercano a la Tierra, su periodo (el tiempo de una órbita completa alrededor de la Tierra) es de unos 90 minutos. Cuando la altura es mayor, la rapidez orbital es menor, la longitud de la órbita es mayor y el periodo también es mayor. Por ejemplo, los satélites de comunicaciones que están en órbita, a 5.5 radios terrestres sobre la superficie de la Tierra, tienen periodos de 24 horas. Este periodo coincide con el periodo de la rotación diaria de la Tierra. Si su órbita es alrededor del ecuador, esos satélites permanecen sobre el mismo punto del suelo. La Luna está todavía más lejos, y su periodo es de 27.3 días.

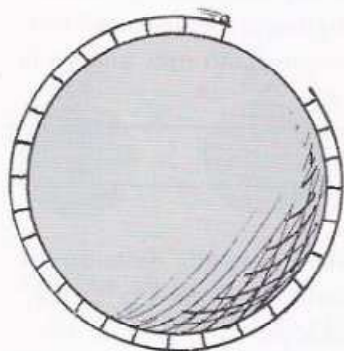


FIGURA 10.23

¿Qué rapidez permitirá que la bola salve el hueco?

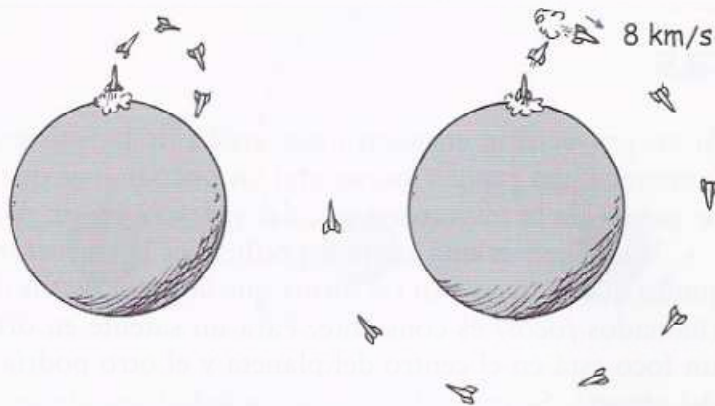


FIGURA 10.24

El empuje inicial del cohete lo impulsa sobre la atmósfera. Se requiere otro empujón para llegar a una rapidez tangencial mínima de 8 km/s para que el cohete caiga alrededor de la Tierra, y no hacia ella.



El ascenso vertical inicial hace que un cohete atraviese rápidamente la parte más densa de la atmósfera. Al final, el cohete debe adquirir suficiente rapidez tangencial para permanecer en órbita sin propulsión, así que debe inclinarse hasta que su trayectoria sea paralela a la superficie terrestre.

¡EUREKA!

Cuanto más alto esté la órbita de un satélite, su rapidez será menor, su trayectoria mayor y su periodo también mayor.¹

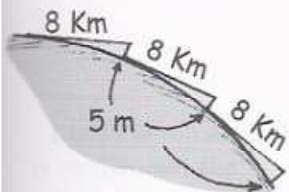
Para poner en órbita una carga se requiere controlar la rapidez y la dirección del cohete que la lleve arriba de la atmósfera. Un cohete lanzado verticalmente, después se inclina en forma intencional para apartarlo de su curso vertical. Entonces, una vez que está sobre la resistencia de la atmósfera, se apunta horizontalmente, y se le da a la carga un empuje final para que alcance su rapidez orbital. Esto se observa en la figura 10.24, donde para simplificar esa carga vemos un cohete de una etapa. Con la velocidad tangencial adecuada cae alrededor de la Tierra, y no hacia ella, y se transforma en un satélite de la Tierra.

EXAMÍNAME

1. ¿Cierto o falso? El transbordador espacial describe órbitas a altitudes mayores de 150 kilómetros, para estar arriba tanto de la gravedad como de la atmósfera terrestre.
2. Los satélites en órbita circular cercana caen unos 5 metros cada segundo en su órbita. ¿Por qué no se acumula esta distancia y los satélites caen a la superficie terrestre?

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. Falso. Lo que salvan los satélites allá arriba es la atmósfera y la resistencia del aire. ¡No la gravedad! Es importante notar que la gravedad de la Tierra se extiende por todo el Universo, de acuerdo con la ley del cuadrado inverso.
2. En cada segundo, el satélite cae unos 5 m abajo de la tangente que seguiría si no hubiera gravedad. También la superficie terrestre se curva 5 m abajo de una recta tangente de 8 km de longitud. El proceso de caer con la curvatura de la Tierra continúa de una tangente a la siguiente, por lo que la trayectoria curva del satélite y la curva de la superficie terrestre quedan "empatadas" en todo el derredor de la Tierra. De hecho, los satélites caen de vez en cuando sobre la superficie terrestre, cuando se encuentran con resistencia del aire en la alta atmósfera, que hace disminuir su rapidez orbital.



¹ La rapidez de un satélite en órbita circular es $v = \sqrt{GM/d}$, y el periodo de su movimiento es $T = 2\pi \sqrt{d^3/GM}$, donde G es la constante de la gravitación universal (véase el capítulo 9), M es la masa de la Tierra (o del cuerpo en torno al cual se mueva el satélite) y d es la distancia del satélite al centro de la Tierra o de su planeta.

Órbitas elípticas

Si un proyectil se encuentra por arriba de la resistencia de la atmósfera y se le comunica una rapidez horizontal un poco mayor que 8 kilómetros por segundo, se pasará de la trayectoria circular y describirá un óvalo, llamado **elipse**.

Una elipse es una curva específica: es la trayectoria cerrada que adquiere un punto que se mueve en tal forma que la suma de sus distancias a dos puntos fijos (llamados *focos*) es constante. Para un satélite en órbita en torno a un planeta, un foco está en el centro del planeta y el otro podría estar en el interior o fuera del planeta. Se puede trazar con facilidad una elipse clavando un par de tachuelas (una en cada foco) y con un cordón y un lápiz (figura 10.25). Cuando más cercanos estén los focos entre sí, la elipse se acercará más a un círculo. Cuando ambos focos están juntos, la elipse es un círculo. Vemos entonces que un círculo es un caso especial de una elipse.

Si bien la rapidez de un satélite es constante en una órbita circular, varía en una órbita elíptica. Cuando la rapidez inicial es mayor que 8 kilómetros por segundo, el satélite se pasa de una trayectoria circular y se aleja de la Tierra, en contra la fuerza de gravedad. De este modo pierde rapidez. La rapidez que pierde al alejarse la vuelve a ganar al caer de regreso hacia la Tierra, y al final se reúne con su trayectoria original, con la misma rapidez que tenía al principio (figura 10.27). Este procedimiento se repite una y otra vez, y en cada ciclo se describe una elipse.

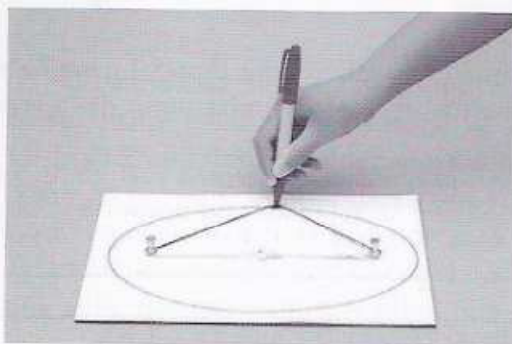


FIGURA 10.26 [Figura interactiva](#)
Método sencillo para trazar una elipse.

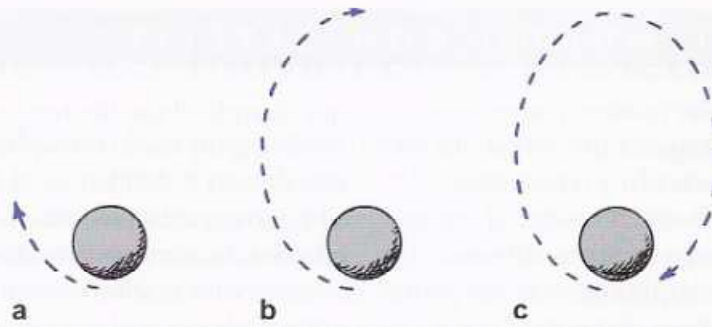
Es interesante el hecho de que una trayectoria parabólica como la de una pelota lanzada o una bala disparada sea en realidad un segmento diminuto de una elipse muy estrecha, que se prolonga hasta un poco más allá del centro de la Tierra (figura 10.28a). En la figura 10.28b se ven varias trayectorias de balas disparadas desde la montaña de Newton. Todas esas elipses tienen al centro de la Tierra en uno de sus focos.



FIGURA 10.26
Las sombras producidas por la pelota son elipses, una por cada lámpara en el recinto. El punto en el que la pelota hace contacto con la mesa es el foco común de las tres elipses.

FIGURA 10.27

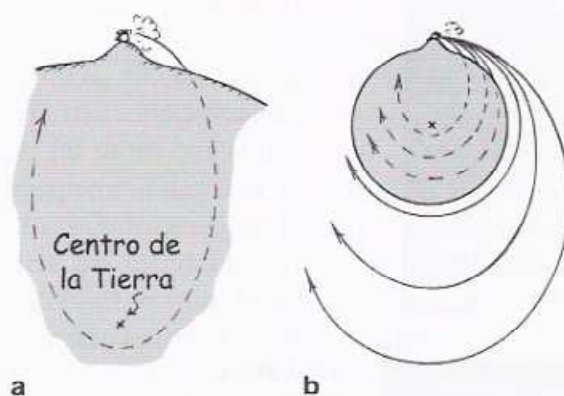
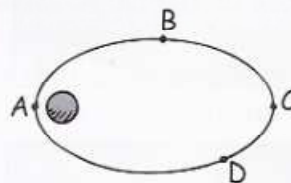
Órbita elíptica. Un satélite terrestre que tenga una rapidez un poco mayor que 8 km/s se pasa de una órbita circular *a*) y se aleja de la Tierra. La gravitación lo desacelera hasta un punto en que ya no se aleja de la Tierra *b*). Cae hacia la Tierra, aumentando la rapidez que perdió al alejarse y *c*) sigue la misma trayectoria que antes, en un ciclo repetitivo.



A medida que aumenta la velocidad inicial, las elipses son menos excéntricas (más circulares) y cuando la velocidad de salida del cañón llega a $8 \text{ kilómetros por segundo}$, la elipse se redondea y se transforma en un círculo, y ya no se cruza con la superficie terrestre. La bala de cañón sigue entonces una órbita circular. Con mayores velocidades iniciales, la bala de cañón, en órbita, traza la acostumbrada elipse externa.

EXAMÍNATE

En el esquema se ve la trayectoria orbital de un satélite. ¿En cuál o cuáles de las posiciones marcadas con A a D el satélite tiene la máxima rapidez? ¿Y la mínima rapidez?

**FIGURA 10.28**

a) La trayectoria parabólica de la bala es parte de una elipse que se prolonga en el interior de la Tierra. El centro de la Tierra es el foco lejano. b) Todas las trayectorias de la bala son elipses. Cuando las rapideces son menores que las orbitales, el centro de la Tierra es el foco lejano; para la órbita circular, los dos focos están en el centro de la Tierra; cuando las rapideces son mayores, el foco cercano es el centro de la Tierra.

COMPRUEBA TU RESPUESTA

El satélite tiene su máxima rapidez al pasar por A, y su rapidez mínima en la posición C. Después de pasar por C, aumenta su rapidez al caer de regreso hacia A, para repetir su ciclo.

VIGILANCIA DEL MUNDO CON SATÉLITE

Los satélites son útiles para vigilar nuestro planeta. La figura A muestra la trayectoria seguida por un satélite en uno de sus periodos, en órbita circular y lanzado en dirección noreste del Cabo Cañaveral, Florida. La trayectoria se curva sólo porque el mapa es plano. Observa que la trayectoria cruza al ecuador dos veces en un periodo, porque describe un círculo cuyo plano pasa por el centro de la Tierra. Observa también que esa trayectoria no termina donde comienza. Esto se debe a que la Tierra gira bajo el satélite mientras está en órbita. Durante el periodo de 90 minutos, la Tierra gira 22.6° , de manera

que cuando el satélite termina una órbita completa comienza un nuevo recorrido muchos kilómetros hacia el oeste (unos 2,500 km en el ecuador). Esto es bastante cómodo para los satélites que vigilan la Tierra. La figura B muestra, la zona vigilada durante 10 días, en pasos sucesivos, por un satélite normal. Un ejemplo notable, pero normal, de esa vigilancia es el monitoreo mundial durante tres años de la distribución del fitoplancton marino (figura C). Hubiera sido imposible adquirir esta extensa información si no hubiera satélites.

FIGURA A

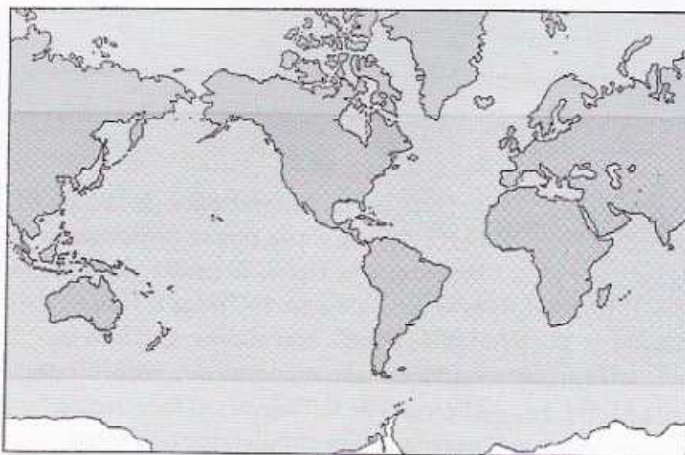
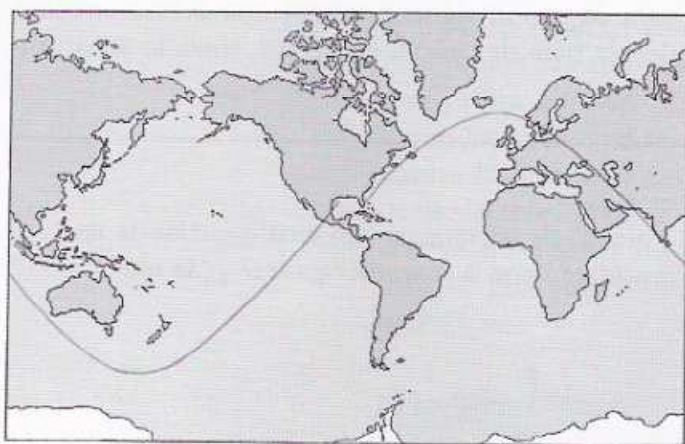
La trayectoria característica de un satélite lanzado en dirección noreste desde Cabo Cañaveral. Debido a que la Tierra gira mientras el satélite describe su órbita, cada pasada se desplaza unos 2,100 km hacia el oeste, en la latitud del Cabo Cañaveral.

FIGURA B

Distribución característica de las pasadas de un satélite durante una semana.

FIGURA C

Producción de fitoplancton en los océanos de la Tierra, durante un periodo de 3 años. Las máximas concentraciones se observan en los colores más claros y más oscuros.



Leyes de Kepler del movimiento planetario



Tycho Brahe (1546-1601)



Johannes Kepler (1571-1630)

A la ley de la gravitación universal de Newton antecedieron tres descubrimientos importantes acerca del movimiento planetario. Fueron de Johannes Kepler, astrónomo alemán, que se iniciaba como joven asistente de Tycho Brahe, danés, entonces de gran fama. Brahe dirigía el primer gran observatorio en el mundo, en Dinamarca, justo antes de la llegada del telescopio. Usando gigantescos instrumentos semejantes a transportadores, llamados *cuadrantes*, Brahe midió las posiciones de los planetas durante 20 años con tanta exactitud que sus resultados aún son válidos en la actualidad. Brahe confió a Kepler sus datos, y después de morir Brahe, Kepler convirtió las mediciones de Brahe a valores que obtendría un observador estacionario fuera del sistema solar. Después de años de esfuerzos la expectativa de Kepler, de que los planetas se moverían describiendo círculos perfectos en torno al Sol, quedó hecha añicos. Encontró que las trayectorias son elipses. La primera ley de Kepler del movimiento planetario es la siguiente:

La trayectoria de cada planeta alrededor del Sol es una elipse y el Sol se encuentra en uno de sus focos.

Kepler también encontró que los planetas no giran en torno al Sol con rapidez uniforme, sino que se mueven con mayor rapidez cuando están más cerca del Sol, y con menor rapidez cuando están más alejados de éste. Lo hacen de modo que una recta o un rayo imaginario, que una al Sol con el planeta, barre áreas iguales de espacio en intervalos iguales de tiempo. El área triangular recorrida durante un mes, cuando un planeta está en órbita alejado del Sol (triángulo ASB de la figura 10.29) es igual al área triangular que barre el planeta durante un mes, cuando el planeta en órbita está cercano al Sol (triángulo CSD en la figura 10.29). Ésta es la segunda ley de Kepler:

La línea del Sol a cualquier planeta barre áreas iguales de espacio en intervalos de tiempo iguales.

Kepler fue quien primero acuñó la palabra *satélite*. No tenía ideas claras acerca de *por qué* los planetas se movían como él descubrió. Carecía de un modelo conceptual. No vio que un satélite no es más que un proyectil bajo la influencia de una fuerza gravitacional dirigida hacia el cuerpo alrededor del cual gira el satélite. Tú sabes que si lanzas una piedra hacia arriba, desacelera a medida que sube, porque va *contra* la gravedad. Y sabes que cuando regresa va *con* la gravedad, y su rapidez aumenta. Kepler no percibió que un satélite se comporta igual. Al alejarse del Sol, desacelera. Al acercarse al Sol, acelera. Un satélite, sea de un planeta o del Sol, o uno de los actuales que se mueven alrededor de la Tierra, se mueve con más lentitud contra el campo gravitacional y más rápidamente en dirección de tal campo. Kepler no vio esta simplicidad y en cambio fabricó sistemas complicados de figuras geométricas que le dieran sentido a sus descubrimientos. Esos sistemas resultaron insustanciales.

Diez años después de investigar mediante el ensayo y el error, buscando una relación entre el tiempo que tarda un planeta en dar una órbita en torno al Sol y la distancia respecto de éste, Kepler descubrió una tercera ley. Con los datos de Brahe, Kepler encontró que el cuadrado de un periodo (T) es directamente proporcional al cubo de su radio orbital promedio (r). La tercera ley es:

El cuadrado del periodo orbital de un planeta es directamente proporcional al cubo de su distancia promedio al Sol ($T^2 \sim r^3$ para cualquier planeta).

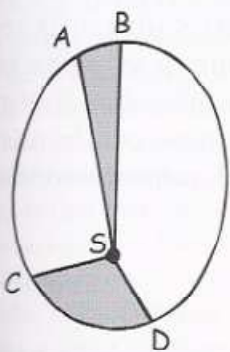


FIGURA 10.29
Se barren áreas iguales en intervalos de tiempo iguales.



Con la tercera ley de Kepler es posible calcular el radio de la órbita de un planeta, a partir de su periodo orbital.

¡EUREKA!

Esto significa que el cociente T^2/r^3 es el mismo para todos los planetas. Así, si se conoce el periodo de un planeta, se calcula con facilidad el promedio de su distancia radial orbital (o viceversa)

Es interesante destacar que Kepler conocía las ideas de Galileo, acerca de la inercia y del movimiento acelerado, pero no las aplicó a sus propios trabajos. Al igual que Aristóteles, pensaba que la fuerza sobre un cuerpo en movimiento debería tener la misma dirección que la del movimiento del cuerpo. Nunca apreció el concepto de la inercia. Por otro lado, Galileo nunca apreció el trabajo de Kepler, y mantuvo su convicción de que los planetas se mueven en círculos.² Para entender más el movimiento planetario se necesitaba alguien que pudiera integrar los resultados de esos dos grandes científicos.³ El resto es historia conocida, porque esta tarea quedó a cargo de Isaac Newton.

Conservación de la energía y movimiento de los satélites

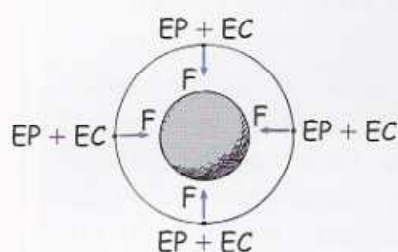


FIGURA 10.30

La fuerza de la gravedad sobre el satélite siempre es hacia el centro del cuerpo alrededor del cual se mueve en órbita. Para un satélite en órbita circular no hay componente de la fuerza que actúe a lo largo de su dirección de movimiento. La rapidez y, por consiguiente, la EC no cambian.

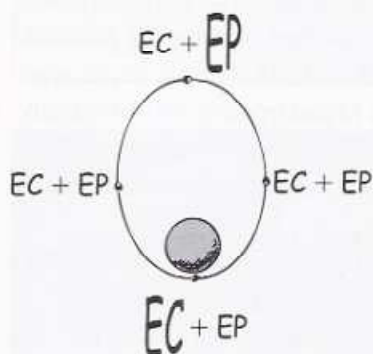


FIGURA 10.31

La suma de la EC y la EP de un satélite es constante en todos los puntos de su órbita.

Del capítulo 7 recordemos que un objeto en movimiento tiene energía cinética (EC) gracias a su movimiento. Un objeto sobre la superficie terrestre posee energía potencial (EP) en virtud de su posición. En cualquier punto de su órbita, un satélite tiene simultáneamente tanto EC como EP. La suma de la EC y la EP es constante en toda la órbita. El caso más sencillo se presenta cuando un satélite está en órbita circular.

En una órbita circular, la distancia entre el satélite y el centro del cuerpo que lo atrae no cambia, lo cual quiere decir que la EP del satélite es igual en cualquier lugar de la órbita. Entonces, de acuerdo con la conservación de la energía, la EC también debe ser constante. Un satélite en órbita circular sigue adelante sin cambiar su EP, su EC ni su rapidez (figura 10.30).

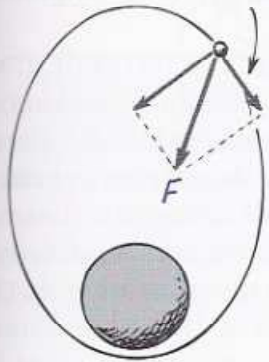
En una órbita elíptica la situación es distinta. Varían tanto la rapidez como la distancia. La EP es máxima cuando el satélite está más alejado (en su *apogeo*) y es mínima cuando está más cerca (en su *perigeo*). Observa que la EC es mínima cuando la EP es máxima, y que la EC es máxima cuando la EP es mínima. En cualquier punto de la órbita, la suma de EC y EP es la misma (figura 10.31).

En todos los puntos de la órbita elíptica, excepto el perigeo y en el apogeo, hay un componente de la fuerza gravitacional que es paralelo a la dirección del movimiento del satélite. Este componente de la fuerza cambia la rapidez del satélite. También se puede decir que (este componente de la fuerza) $\times$ (distancia recorrida) = ΔEC . De cualquier modo, cuando el satélite gana altura y se mueve contra este componente, disminuyen su rapidez y su EC. La disminución continúa hasta el apogeo. Una vez pasado el apogeo, el satélite se mueve con la misma dirección del componente, y aumentan la rapidez y la EC. El aumento continúa hasta que el satélite rebasa el perigeo y repite el ciclo.

² No es fácil considerar lo familiar a través de las ideas nuevas de otros individuos. Tendemos sólo a ver lo que hemos aprendido a ver, o lo que deseamos ver. Galileo informó que muchos de sus colegas no podían o se rehusaban a ver las lunas de Júpiter cuando veían escépticamente por los telescopios de él. Esos telescopios fueron una bendición para la astronomía, pero más importante que un instrumento nuevo para ver las cosas, era una forma nueva de comprender lo que se veía. ¿Seguirá siendo igual hoy?

³ La tercera ley de Kepler es el resultado de igualar la fórmula de Newton, del cuadrado inverso de la fuerza gravitacional, a la fuerza centrípeta, y cómo T^2/r^3 es una constante que sólo depende de G y M , la masa del cuerpo en torno al cual se describe la órbita. ¡Algo muy interesante!

El componente de fuerza si influye sobre el satélite



EXAMÍNATE

1. En el esquema se muestra la trayectoria orbital de un satélite. ¿En cuál de las posiciones marcadas con A a D el satélite tiene la máxima EC? ¿Y la máxima EP? ¿Y la máxima energía total?
2. ¿Por qué la fuerza de gravedad cambia la rapidez de un satélite cuando está en órbita elíptica pero no cuando está en órbita circular?

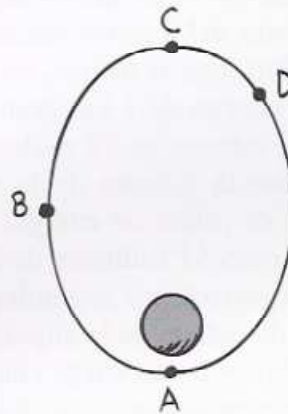


FIGURA 10.32

En una órbita elíptica hay un componente de la fuerza a lo largo de la dirección del movimiento del satélite. Este componente cambia la rapidez y, en consecuencia, la EC. (El componente perpendicular sólo cambia la dirección.)

Rapidez de escape

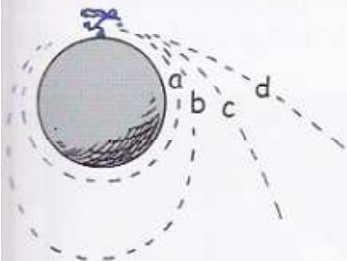


FIGURA 10.33

Figura interactiva

Si Superman lanzara una pelota a 8 km/s de forma horizontal desde la cima de una montaña suficientemente alta para estar arriba de la resistencia del aire, a) entonces después de unos 90 minutos la podría atrapar (sin tener en cuenta la rotación de la Tierra). Si la lanzara un poco más rápido, b) tomaría una órbita elíptica y regresaría en un tiempo un poco mayor. Si la lanzara a más de 11.2 km/s, c) escaparía de la Tierra. Si la lanzara a más de 42.5 km/s, d) escaparía del Sistema Solar.

Sabemos que una bala de cañón disparada horizontalmente a 8 kilómetros por segundo, desde la montaña de Newton, se pondría en órbita. Pero, ¿qué sucedería si en vez de eso el cañón se disparara *verticalmente* con la misma rapidez? La bala subiría hasta una altura máxima, invertiría su dirección y caería de regreso a la Tierra. Sería válido el viejo dicho de “lo que sube debe bajar”, con tanta seguridad como que una piedra lanzada hacia el cielo será regresada por la gravedad (a menos que, como veremos, su rapidez sea suficientemente grande).

En la época actual de los viajes espaciales es más correcto decir “lo que sube *puede* bajar”, porque hay una rapidez crítica inicial que permite que un proyectil venza a la gravedad y escape de la Tierra. A esta rapidez crítica se le llama **rapidez de escape**, o bien, si interviene su dirección, **velocidad de escape**. Desde la superficie de la Tierra, la rapidez de escape es 11.2 kilómetros por segundo. Si se

COMPRUEBA TUS RESPUESTAS

1. La EC es máxima en el perigeo en A; la EP es máxima en el apogeo en C; la energía total es igual en todos los lugares de la órbita.
2. En una órbita circular, la fuerza gravitacional siempre es perpendicular a la trayectoria orbital. No hay componente de la fuerza gravitacional a lo largo de la tangente, y sólo cambia la dirección del movimiento, pero no la rapidez. Sin embargo, en la órbita elíptica el satélite se mueve en direcciones que no son perpendiculares a la fuerza de la gravedad. Entonces sí existen componentes de la fuerza a lo largo de la tangente, que cambian la rapidez del satélite. Un componente de la fuerza tangente a la dirección con que se mueve el satélite efectúa trabajo para cambiar su EC.



¿Acaso Newton no se habría entusiasmado al ver el movimiento de los satélites en términos de *energía*, un concepto que se introdujo mucho después?

¡EUREKA!

lanza un proyectil a cualquier velocidad mayor que ésta, dejará la Tierra, viajando cada vez más lento, pero nunca se detendrá a causa de la gravedad de la Tierra.⁴ Podemos darnos una idea de la magnitud de esta rapidez desde el punto de vista de la energía.

¿Cuánto trabajo se necesitaría para subir una carga contra la fuerza de gravedad de la Tierra, hasta una distancia muy, muy grande (“infinita”)? Podemos imaginar que el cambio de EP sería infinito, porque la distancia es infinita. Pero la gravedad disminuye al aumentar la distancia, según la ley del inverso del cuadrado. La fuerza de gravedad sobre la carga sólo sería grande cerca de la Tierra. La mayoría del trabajo efectuado para lanzar un cohete ocurre en los primeros 10,000 km, más o menos, de distancia de la Tierra. Resulta que el cambio de EP para un cuerpo de 1 kilogramo subido desde la superficie de la Tierra hasta una distancia infinita es 62 millones de joules (62 MJ). Así, para poner una carga a una distancia infinita de la superficie terrestre se requiere, como mínimo, 62 millones de joules de energía por kilogramo de carga. No describiremos aquí el cálculo, pero 62 millones de joules por kilogramo corresponde a una rapidez de 11.2 kilómetros por segundo, sea cual fuere la masa total que intervenga. Es la rapidez de escape de la superficie de la Tierra.⁵

Si damos a una carga cualquier energía mayor que 62 millones de joules por kilogramo en la superficie de la Tierra o, lo que es igual, cualquier rapidez mayor que 11.2 kilómetros por segundo, entonces, sin tener en cuenta la resistencia del aire, la carga escapará de la Tierra y nunca regresará. Al continuar alejándose aumenta su EP y disminuye su EC. Su rapidez disminuye cada vez más, pero nunca se reduce a cero. La carga deja atrás la gravedad de la Tierra y se escapa.

En la tabla 10.1 presentamos las rapidezces de escape de varios cuerpos del sistema solar. Observa que la rapidez de escape de la superficie del Sol es 620 kiló-

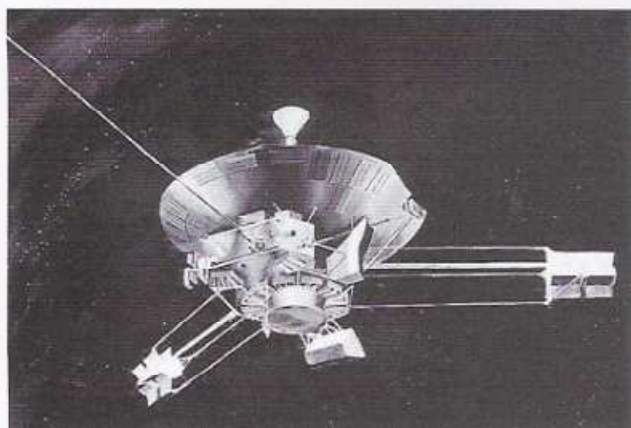


FIGURA 10.34

La sonda *Pioneer 10*, lanzada desde la Tierra en 1972, pasó por el planeta más externo en 1984 y hoy vaga en nuestra galaxia.



FIGURA 10.35

El vehículo espacial europeo-estadounidense *Cassini* transmite a la Tierra imágenes cercanas de Saturno y su enorme luna Titán. También mide las temperaturas y los campos magnéticos de la superficie, así como el tamaño, la rapidez y las trayectorias de las diminutas partículas espaciales que lo rodean.

⁴ La rapidez de escape de cualquier planeta o cuerpo es $v = \sqrt{2GM/d}$, donde G es la constante de la gravitación universal, M es la masa del cuerpo que atrae y d es la distancia hacia su centro. (En la superficie del cuerpo, d sólo sería el radio del mismo.) Para tener algo más de perspectiva matemática, compara esta fórmula con la de la rapidez orbital, en la nota al pie 1 unas páginas anteriores.

⁵ Es interesante que a esto se le podría llamar la *máxima rapidez de caída*. Todo objeto, por más alejado que esté de la Tierra y parta del reposo, dejado caer hacia la Tierra sólo bajo la influencia de la gravedad terrestre no iría más rápido que 11.2 km/s (con la fricción del aire, la rapidez sería menor).



Si se lanzara un dulce a la Tierra desde una distancia tan lejana como a la que se encuentra Plutón, ¿su rapidez de impacto sería de 11.2 km/s?

¡EUREKA!

TABLA 10.1

Rapideces de escape en superficies de los cuerpos del sistema solar

Cuerpo Astronómico	Masa (masas terrestres)	Radio (radios terrestres)	Rapidez de escape (km/s)
Sol	333,000	109	620
Sol (a la distancia de la órbita de la Tierra)		23,500	42.2
Júpiter	318	11	60.2
Saturno	95.2	9.2	36.0
Neptuno	17.3	3.47	24.9
Urano	14.5	3.7	22.3
Tierra	1.00	1.00	11.2
Venus	0.82	0.95	10.4
Marte	0.11	0.53	5.0
Mercurio	0.055	0.38	4.3
Luna	0.0123	0.27	2.4



Así como los planetas giran alrededor del Sol, las estrellas giran alrededor de los centros de las galaxias. Aquellas con rapidez tangencial insuficiente son jaladas hacia el núcleo galáctico, por lo general, un agujero negro.

¡EUREKA!

metros por segundo. Aun a la distancia de 150,000,000 km que hay de la Tierra al Sol, la rapidez de escape para liberarse de la influencia del Sol es 42.5 kilómetros por segundo, bastante mayor que la rapidez de escape de la Tierra. Un objeto lanzado de la Tierra con una rapidez mayor que 11.2 kilómetros por segundo, pero menor que 42.5 kilómetros por segundo, se escapará de la Tierra, pero no del Sol. En vez de alejarse por siempre, tomará una órbita alrededor del Sol.

La primera sonda en escapar del sistema solar fue la *Pioneer 10*, y salió de la Tierra en 1972, con una rapidez de sólo 15 kilómetros por segundo. El escape se logró dirigiéndola hacia la trayectoria de Júpiter, que se acercaba. El gran campo gravitacional de Júpiter la impulsó y en el proceso aceleró, de forma parecida a como una pelota de béisbol acelera al encontrarse con un bat. Su rapidez al alejarse de Júpiter aumentó lo bastante como para superar la rapidez de escape del Sol, a la distancia de Júpiter. La *Pioneer 10* pasó por la órbita de Plutón en 1984. A menos que choque con algún otro cuerpo, seguirá errante en forma indefinida por el espacio interestelar. Como una botella lanzada al mar con un mensaje en su interior, la *Pioneer 10* contiene información sobre la Tierra que pudiera interesar a formas de vida extraterrestre, esperando que algún día llegue a “encallar en alguna distante playa”.

Es importante destacar que la rapidez de escape de un cuerpo es la rapidez inicial impartida por un breve empuje, después de lo cual ya no hay fuerza que ayude al movimiento. Se podría escapar de la Tierra con *cualquier* rapidez constante mayor que cero, si el tiempo es el suficiente. Por ejemplo, supón que se dispara un cohete hacia un destino como la Luna. Si se agota el combustible cuando todavía está cerca de la Tierra, necesita una rapidez mínima de 11.2 kilómetros por segundo. Pero si pueden durar encendidos los motores durante tiempos prolongados, el cohete podría llegar a la Luna sin haber alcanzado nunca los 11.2 kilómetros por segundo.

Es importante notar que la exactitud con la cual un cohete no tripulado llega a su destino no se logra conservándolo en una trayectoria planeada con anterioridad, ni devolviéndolo a esa trayectoria, si se sale de la ruta. No se intenta regresar al cohete a su trayectoria original. En vez de ello, lo que pregunta el centro de control es:



La mente que abarca el Universo es tan maravillosa como el Universo que abarca la mente.

¡EUREKA!

“¿Dónde está ahora y cuál es su velocidad? ¿Cuál es la mejor forma de hacer que llegue a su destino, dada su situación actual?” Con ayuda de computadoras de alta velocidad, se usan las respuestas a estas preguntas para trazar una nueva trayectoria. Los reactores correctivos ponen al cohete en esta nueva trayectoria. Tal proceso se repite una y otra vez, durante todo el camino hasta la meta.⁶

“¿Se puede aprender algo de esto? Supón que has perdido la ruta. Puedes, como el cohete, ver que es más provechoso tomar un rumbo que te conduzca a tu meta, el mejor que puedas trazar desde tu posición y circunstancias actuales, más que tratar de regresar a la ruta que proyectaste desde una posición anterior y quizá bajo circunstancias distintas.

Resumen de términos

Elipse La trayectoria ovalada que sigue un satélite. La suma de las distancias de cualquier punto en ella a dos puntos llamados focos es constante. Cuando los focos están juntos en un lugar, la elipse es un círculo. A medida que los focos se alejan, la elipse se vuelve más “excéntrica”.

Leyes de Kepler Ley 1: La trayectoria de cada planeta alrededor del Sol es una elipse y el Sol se encuentra en uno de sus focos. Ley 2: La recta que va del Sol a cualquier planeta recorre áreas del espacio iguales en intervalos de tiempo iguales. Ley 3: El cuadrado del periodo orbital de un planeta es directamente proporcional al cubo de la distancia promedio de ese planeta al Sol ($T^2 \sim r^3$ para todos los planetas).

Parábola La trayectoria curva que sigue un proyectil cerca de la Tierra, bajo la sola influencia de la gravedad.

Proyectil Cualquier objeto que se mueve por el aire o por el espacio, bajo la influencia de la gravedad.

Rapidez de escape La rapidez que debe tener un proyectil, sonda espacial u objeto similar para escapar de la influencia gravitacional de la Tierra o del cuerpo celeste al cual se atraiga ese objeto.

Satélite Un proyectil o cuerpo celeste pequeño que gira en órbita en torno a un cuerpo celeste mayor.

Sitio Web sugerido

Para información sobre proyectos de viajes espaciales, visita el sitio Web de la National Space Society (NSS) en www.nss.org.

Preguntas de repaso

1. ¿Por qué un proyectil que se mueve horizontalmente con una gran rapidez puede volverse un satélite de la Tierra?

Movimiento de proyectiles

2. ¿Qué es exactamente un proyectil?

Proyectiles disparados horizontalmente

3. ¿Por qué con el tiempo cambia el componente vertical de la velocidad de un proyectil, mientras que el componente horizontal no cambia?

Proyectiles disparados hacia arriba

4. Se lanza una piedra hacia arriba con cierto ángulo. ¿Qué sucede con el componente horizontal de su velocidad conforme sube? ¿Y cuando baja?
5. Se lanza una piedra hacia arriba con cierto ángulo. ¿Qué sucede con el componente vertical de su velocidad conforme sube? ¿Y cuando baja?
6. Un proyectil cae debajo de la trayectoria rectilínea que tomaría si no hubiera gravedad. ¿Cuántos metros cae bajo esta línea si hubiera estado moviéndose 1 s? ¿Y con 2 s?
7. ¿Tu respuesta a la pregunta anterior depende del ángulo con el que se lanzó el proyectil?
8. Un proyectil se dispara hacia arriba, a 75° de la horizontal, y llega al suelo a cierta distancia. ¿Para qué otro ángulo de disparo a la misma rapidez caería este proyectil a la misma distancia?
9. Un proyectil se dispara hacia arriba, a 100 m/s. Si se pudiera desprestigiar la resistencia del aire, ¿con qué rapidez regresaría a su altura inicial?

Proyectiles con movimiento rápido: satélites

10. ¿Cómo puede un proyectil “caer alrededor de la Tierra”?
11. ¿Por qué un proyectil que avanza horizontalmente a 8 km/s sigue una curva que coincide con la curvatura terrestre?
12. ¿Por qué es importante que el proyectil de la pregunta anterior esté arriba de la atmósfera terrestre?

Órbitas circulares de satélites

13. ¿Por qué la fuerza de gravedad no cambia la rapidez de un satélite en órbita circular?

14. ¿Cuánto tiempo tarda un satélite en órbita circular en torno a la Tierra en dar una vuelta?
15. Para las órbitas a mayor altitud, ¿el periodo es mayor o menor?

Órbitas elípticas

16. ¿Por qué la fuerza de gravedad cambia la rapidez de un satélite en órbita elíptica?
17. ¿En qué parte de una órbita elíptica un satélite tiene la máxima rapidez? ¿Y la mínima rapidez?

Leyes de Kepler del movimiento planetario

18. ¿Quién reunió los datos que indicaban que los planetas describen órbitas elípticas alrededor del Sol? ¿Quién descubrió este hecho? ¿Quién lo explicó?
19. ¿Qué descubrió Kepler acerca de la rapidez de los planetas y su distancia al Sol? ¿Consideraba Kepler que los planetas son proyectiles que se mueven bajo la influencia del Sol?
20. En la imaginación de Kepler, ¿cuál es la dirección de la fuerza sobre un planeta? ¿De acuerdo con Newton, ¿cuál es la dirección de esa fuerza?

Conservación de la energía y movimiento de satélites

21. ¿Por qué la energía cinética es una constante para un satélite en órbita circular, pero no para un satélite en órbita elíptica?
22. Con respecto al apogeo y al perigeo de una órbita elíptica, ¿dónde es máxima la energía potencial gravitacional? ¿Dónde es mínima?
23. ¿La suma de las energías cinética y potencial es una constante para satélite en órbitas circulares, en órbitas elípticas o en ambos casos?

Rapidez de escape

24. ¿Cuál es la rapidez mínima para moverse en una órbita cercana a la Tierra? ¿Y la rapidez máxima? ¿Qué sucede por arriba de esta rapidez?
25. Se dice que 11.2 km/s es la rapidez de escape de la Tierra. ¿Será posible escapar de la Tierra a la mitad de esta rapidez? ¿Y a la cuarta parte de esta rapidez? ¿Cómo?

Ejercicios

1. En los clavados sincronizados, los atletas permanecen en el aire durante el mismo tiempo. ¿Esto es posible si tienen pesos diferentes? Argumenta tu respuesta.
2. Supón que haces rodar una pelota sobre una mesa para que caiga al suelo. ¿El tiempo que tarda en golpear el suelo depende de la rapidez de la pelota? (¿Una pelota rápida tardará más en golpear el suelo?) Argumenta tu respuesta.

3. Supón que haces rodar una pelota sobre una mesa para que caiga al suelo. En comparación con un rodamiento lento, una pelota que se mueve rápidamente golpea el suelo con una rapidez mayor? Argumenta tu respuesta.
4. Si lanzas una pelota verticalmente hacia arriba, en un tren que se mueve de manera uniforme, ésta regresará al punto de partida. ¿Sucederá lo mismo si el tren va acelerando? Explica tu respuesta.
5. Por accidente, una caja pesada se cae de un avión que vuela alto, en el mismo momento en que pasa sobre un reluciente Porsche rojo, estacionado en un lote de automóviles. En relación con el Porsche, ¿dónde caerá la caja?



6. Supón que dejas caer un objeto desde un avión que vuela a velocidad constante, y además imagina que la resistencia del aire no afecta al objeto que cae. ¿Cuál será su trayectoria de caída, vista por alguien en reposo en el suelo, no directamente abajo, sino a un lado, donde se pueda tener una buena perspectiva? ¿Cuál será la trayectoria de caída que tú ves desde el avión? ¿Dónde llegará al suelo el objeto, en relación con tu avión? ¿Dónde llegará, en el caso más real en el que la resistencia del aire sí afecte a la caída?
7. Los fragmentos de fuegos artificiales iluminan bellamente el cielo nocturno. a) ¿Qué trayectoria específica traza cada fragmento? b) ¿Qué trayectorias trazarían los fragmentos en una región sin gravedad?



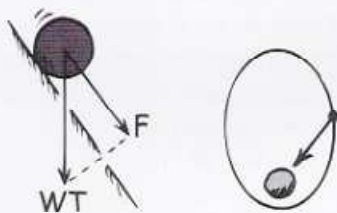
8. En ausencia de la resistencia del aire, ¿por qué no cambia el componente horizontal del movimiento de un proyectil, en tanto que sí cambia el componente vertical?
9. ¿En qué punto de su trayectoria una pelota de béisbol bateada tiene su rapidez mínima? Si se pudiera despreciar la resistencia del aire, ¿cómo se compara esta rapidez con el componente horizontal de su velocidad en otros puntos de su trayectoria?
10. Un amigo dice que las balas disparadas por algunos rifles de alto poder recorren muchos metros en línea recta antes de comenzar a caer. Otro amigo refuta esa afirmación y dice que todas las balas de cualquier rifle caen, por debajo de una trayectoria rectilínea, una distancia vertical dada por $\frac{1}{2}gt^2$, y que la trayectoria curva se nota más con velocidades bajas, y menos con velocidades altas. Ahora es tu turno: ¿Todas las balas caen la misma distancia vertical en tiempos iguales? Explica por qué.
11. Para tener alcance máximo, un balón de fútbol americano se debe patear más o menos a 45° de la horizontal; un poco menos, quizá debido a la resistencia del aire. Pero con frecuencia las patadas se hacen con ángulos mayores que 45° . ¿Te puedes imaginar alguna razón para hacerlo así?
12. Dos golfistas golpean una pelota con la misma rapidez, pero uno a 60° de la horizontal y el otro a 30° . ¿Cuál pelota llegará más lejos? ¿Cuál llega primero al suelo? (No tengas en cuenta la resistencia del aire.)
13. Cuando un rifle se apunta hacia un blanco lejano, ¿por qué su cañón no se alinea de manera que apunte exactamente a ese blanco?
14. Un guardabosques dispara un dardo tranquilizante a un mono que se cuelga de una rama. Apunta directamente al mono, sin darse cuenta de que el dardo seguirá una trayectoria parabólica y, por consiguiente, dará abajo del mono. Sin embargo, el mono ve el dardo que sale del arma y se suelta de la rama, para evitar que lo alcance. ¿De cualquier manera hará blanco en el mono? ¿La velocidad del dardo influye sobre tu respuesta, suponiendo que es la suficiente para recorrer la distancia horizontal al árbol antes de que llegue al suelo? Defiende tu respuesta.



15. Se dispara un proyectil directo hacia arriba, a 141 m/s. ¿Con qué rapidez se mueve en el instante que llega a la cúspide de su trayectoria? Ahora

- supón que se dispara hacia arriba, a 45° . ¿Cuál sería su rapidez en la cúspide de su trayectoria?
16. Cuando saltas hacia arriba, tu tiempo en el aire es el que tus pies están despegados del piso. Este tiempo en el aire, ¿depende del componente vertical de la velocidad al saltar, del componente horizontal de la velocidad, o de ambos? Defiende tu respuesta.
17. El tiempo en el aire de un jugador de baloncesto que salta una altura de 2 pies (0.6 m) es más o menos $2/3$ de segundo. ¿Cuál será su tiempo en el aire si alcanza la misma altura pero al mismo tiempo recorrió horizontalmente 4 pies (1.2 m)?
18. Si la Luna es atraída gravitacionalmente hacia la Tierra, ¿por qué simplemente no choca contra ésta?
19. Cuando el trasbordador espacial sigue una órbita circular a rapidez constante en torno a la Tierra, ¿está acelerando? En caso afirmativo, ¿en qué dirección? En caso negativo, ¿por qué?
20. ¿Qué planetas tienen un periodo mayor que 1 año terrestre, los que están más cerca del Sol que la Tierra, o los que están más lejos?
21. ¿La rapidez de un objeto que cae depende de su masa? ¿La rapidez de un satélite en órbita depende de su masa? Defiende tus respuestas.
22. ¿De qué *no* depende la rapidez de un satélite en órbita? De la masa del satélite, de la masa de la Tierra o de la distancia del satélite a la Tierra.
23. Un objeto que se mueve en círculos requiere de una fuerza centrípeta. ¿Qué suministra esta fuerza en el caso de los satélites que están en órbita alrededor de la Tierra?
24. Marte tiene aproximadamente $1/9$ de la masa de la Tierra. Si Marte estuviera posicionado en la misma órbita de la Tierra, ¿cuánto tiempo tardaría en dar una vuelta alrededor del Sol, en comparación con lo que tarda la Tierra? (Más tiempo, menos tiempo o el mismo).
25. Si alguna vez has visto el lanzamiento de un satélite desde la Tierra, habrás notado que el cohete comienza verticalmente hacia arriba, y a continuación se aparta de la ruta vertical y continúa su subida formando un ángulo. ¿Por qué arranca verticalmente? ¿Por qué no continúa verticalmente?
26. Si una bala de cañón se dispara desde una montaña alta, la gravedad cambia su rapidez en toda su trayectoria. Pero si se dispara con la rapidez suficiente para entrar en órbita circular, su rapidez no cambia en absoluto. Explica por qué.
27. Un satélite puede describir una órbita a 5 km sobre la Luna, pero no a 5 km sobre la Tierra. ¿Por qué?
28. Durante los años 2000 y 2001, la nave espacial NEAR estuvo en órbita en torno al asteroide Eros, de 20 millas de longitud. ¿La rapidez orbital de esta nave espacial era mayor o menor que 8 km/s? ¿Por qué?
29. La rapidez de un satélite en órbita circular cercana en torno a Júpiter, ¿sería mayor, igual o menor que 8 km/s?

30. ¿Por qué los satélites se suelen poner en órbita disparándolos hacia el oriente, que es la dirección en la cual gira la Tierra?
31. Cuando desacelera un satélite en órbita circular, quizá porque haya disparado un "retrocohetes", después adquiere mayor rapidez que antes. ¿Por qué?
32. De todo Estados Unidos de Norteamérica, ¿por qué Hawai es el sitio más adecuado para disparar satélites con trayectoria no polar? (*Sugerencia:* mira un modelo de Tierra giratoria desde arriba de cualquier polo y compárala con una tornamesa girando.)
33. La Tierra está más cerca del Sol en diciembre que en junio. ¿En cuál de estos dos meses la Tierra se mueve más rápido alrededor del Sol?
34. Hay dos planetas que nunca se ven a media noche. ¿Cuáles son y por qué?
35. Por qué un satélite arde al descender a la atmósfera, pero no arde cuando asciende por la atmósfera?
36. Sin considerar la resistencia del aire, ¿se podría poner un satélite en órbita en un túnel que le diera la vuelta a la Tierra, abajo del suelo? Comenta este ejercicio.
37. En el siguiente esquema una pelota gana EC al rodar cuesta abajo, porque el componente del peso (F) que actúa en la dirección del movimiento efectúa el trabajo. Haz un esquema del componente similar al de la fuerza gravitacional que efectúa el trabajo y cambia la EC del satélite de la derecha.

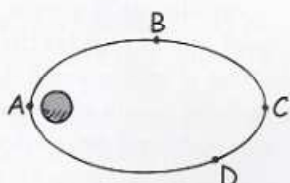


38. ¿Por qué la fuerza de gravedad efectúa trabajo sobre un satélite cuando se mueve de una parte a otra de una órbita elíptica, pero no cuando la órbita es circular?
39. ¿Cuál es la forma de la órbita cuando la velocidad del satélite es siempre perpendicular a la fuerza de gravedad?
40. Si el trasbordador espacial se moviera en círculo en torno a la Tierra a una distancia igual a la que hay de la Tierra a la Luna, ¿cuánto tiempo tardaría en describir una órbita completa? En otras palabras, ¿cuál sería su periodo?
41. ¿Puede un satélite seguir avanzando en una órbita estable en un plano que no pase por el centro de la Tierra? Sustenta tu respuesta.
42. ¿Puede un satélite mantenerse en órbita en el plano del Círculo Ártico? ¿Por qué?
43. Un satélite de comunicaciones tiene un periodo de 24 horas, y está suspendido sobre un punto fijo de la Tierra. ¿Por qué se pone en órbita sólo en el plano del

- ecuador terrestre? (*Sugerencia:* imagina que la órbita del satélite es un anillo que rodea la Tierra.)
44. Un satélite terrestre "geosincrónico" puede permanecer directamente arriba de Singapur, pero no en San Francisco. ¿Por qué?
45. Cuando un satélite terrestre se pone en una órbita máxima, ¿qué sucede durante su periodo?
46. Si desde un jumbo un mecánico de vuelo deja caer una llave inglesa a gran altitud, ésta caerá a tierra. Si un astronauta en el trasbordador espacial en órbita deja caer una llave, ¿también caerá ésta a la Tierra? Defiende tu respuesta.
47. ¿Cómo es que un astronauta en un trasbordador espacial podría "dejar caer" verticalmente un objeto hacia la Tierra?
48. Una nave espacial en una órbita a gran altura avanza a 7 km/s con respecto a la Tierra. Supón que lanza hacia atrás una cápsula, a 7 km/s con respecto a la nave. Describe la trayectoria de la cápsula con respecto a la Tierra.
49. Un satélite en órbita circular en torno a la Luna dispara una sonda pequeña en dirección contraria a su velocidad. Si la rapidez de la sonda en relación con el satélite es igual que la rapidez del satélite respecto a la Luna, describe el movimiento de la sonda. Si la rapidez relativa de la sonda es el doble de la rapidez del satélite, ¿por qué sería peligroso para el satélite?
50. La velocidad orbital de la Tierra en torno al Sol es de unos 30 km/s. Si de repente se detuviera la Tierra en su viaje, simplemente caería radialmente al Sol. Elabora un plan con el cual un cohete cargado con desechos radiactivos pueda dispararse hacia el Sol, para su desecho permanente. ¿Con qué rapidez y en qué dirección respecto a la órbita de la Tierra se debe disparar ese cohete?
51. Si detuvieras un satélite terrestre hasta inmovilizarlo en su órbita, simplemente se estrellaría contra la Tierra. Entonces, ¿por qué los satélites de comunicaciones que están "suspendidos" sobre el mismo lugar de la Tierra no se estrellan contra ésta?
52. En una explosión accidental, un satélite se rompe a la mitad al estar en órbita circular en torno a la Tierra. Una de las mitades se detiene por completo, momentáneamente. ¿Cuál será el destino de esa mitad? ¿Qué le sucederá a la otra mitad?
53. Una enorme rueda giratoria en el espacio provee gravedad artificial a sus ocupantes, como se explicó en el capítulo 8. En vez de una rueda completa, analiza la idea de un par de cápsulas unidas por un cable y que giran una alrededor de la otra. ¿Un arreglo así daría gravedad artificial a sus ocupantes?
54. ¿Qué ventaja existe en lanzar vehículos espaciales desde naves que vuelan a gran altura, en vez de lanzarlos desde el suelo?
55. La rapidez de escape de la superficie terrestre es de 11.2 km/s, pero un vehículo espacial podría escapar

de la Tierra a la mitad de esta rapidez, o incluso menos. Explica cómo.

56. ¿Cuál es la máxima rapidez de impacto posible en la superficie de la Tierra, de un cuerpo lejano inicialmente en reposo que cae a la Tierra debido tan sólo a la gravedad terrestre?
57. Si a Plutón se le detuviera en su órbita caería directo al Sol, y no caería en torno al Sol. ¿Cuándo llegara al Sol con qué rapidez se movería?
58. ¿En qué punto de su órbita elíptica alrededor del Sol la aceleración de la Tierra hacia el Sol es máxima? ¿En qué punto es la mínima? Argumenta tus respuestas.
59. ¿En cuál de las posiciones indicadas el satélite en órbita elíptica tiene la máxima fuerza gravitacional? ¿Dónde tiene la máxima rapidez? ¿Dónde tiene la máxima velocidad? ¿La máxima cantidad de movimiento? ¿La máxima energía cinética? ¿La máxima energía potencial gravitacional? ¿La máxima energía total? ¿La máxima cantidad de movimiento angular? ¿La máxima aceleración?



60. Un cohete avanza en una órbita elíptica en torno a la Tierra. Para alcanzar la máxima cantidad de EC para escapar, usando determinada cantidad de combustible, ¿debe encender sus motores en el apogeo o en el perigeo? (Sugerencia: deja que la fórmula $Fd = \Delta EC$ guíe tus razonamientos. Supón que el empuje F es breve, y de la misma duración en cada caso. Luego considera la distancia d que avanzaría el cohete durante este breve arranque en el apogeo y en el perigeo.)

Problemas

1. Se lanza una pelota horizontalmente desde el borde de un barranco, con una rapidez de 10 m/s. ¿Cuál será su rapidez un segundo después?
2. Un avión vuela horizontalmente con una rapidez de 1,000 km/h (280 m/s), cuando se le cae un motor.

Sin tener en cuenta la resistencia del aire, el motor tarda 30 s en llegar al suelo. a) ¿A qué altitud vuela el avión? b) ¿Qué distancia horizontal recorre el motor mientras cae? c) Si el avión siguiera volando como si nada hubiera pasado, ¿dónde estaría el motor, en relación con el avión, cuando llega al suelo?

3. Se dispara una bala de cañón con una velocidad inicial de 141 m/s a un ángulo de 45° . Describe una trayectoria parabólica que hace blanco en un globo, en la cúspide de su trayectoria. Sin tener en cuenta la resistencia del aire, ¿qué rapidez tiene la bala al dar en el globo?
4. Los alumnos de un laboratorio miden la rapidez de un balón de acero, que se lanza horizontalmente desde una mesa, y resulta ser de 4.0 m/s. Si la superficie de la mesa está a 1.5 m sobre el piso, ¿dónde deben poner una lata de café de 20 cm de altura para atrapar el balón cuando caiga?
5. John y Tracy ven desde un balcón de 80 m de altura una alberca abajo; no exactamente abajo, sino a 20 m del pie de su edificio. Se preguntan con qué rapidez deben saltar horizontalmente para caer en la alberca. ¿Cuál es la respuesta?
6. Sin tener en cuenta la resistencia del aire, ¿cuál será la rapidez máxima posible para que una pelota de tenis que se mueva horizontalmente, al pasar sobre la red de 1.0 m de alto, caiga dentro de los límites del campo, a 12.0 m de distancia de la red?
7. Calcula el tiempo en el aire de una persona que se mueve 3 m horizontalmente durante un salto de 1.25 m de alto. ¿Cuál es su tiempo en el aire, si se mueve 6 m horizontalmente durante este salto?
8. Calcula la rapidez, en m/s, con la que gira la Tierra alrededor del Sol. Puedes suponer que su órbita es casi circular.
9. La Luna está a unos 3.8×10^5 km de la Tierra. Calcula su rapidez orbital promedio alrededor de la Tierra.
10. Un satélite tiene una energía cinética de 8,000 millones de joules en su perigeo (el punto más cercano a la Tierra), y 5,000 millones de joules en su apogeo (el punto más alejado de la Tierra). Cuando el satélite va del apogeo al perigeo, ¿cuánto trabajo ejerce sobre él la fuerza gravitacional de la Tierra? ¿Su energía potencial aumenta o disminuye durante este tiempo? ¿Cuánto?